



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

INÊZ PRAZERES VIRGINIO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE EDIFÍCIOS SUBMETIDOS A
REFORÇO DE FUNDAÇÕES**

Recife, PE

2024



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

INÊZ PRAZERES VIRGINIO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE EDIFÍCIOS SUBMETIDOS A
REFORÇO DE FUNDAÇÕES**

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof^o Alexandre Duarte Gusmão

Coorientador: Prof^o Pedro Eugênio Silva de Oliveira

Recife, PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco

Virginio, Inêz Prazeres
V817a Análise de desempenho de edifícios submetidos a reforço
de fundações. / Inêz Prazeres Virginio. – Recife: UPE, Escola
Politécnica, 2024.

182 f. il.
Inclui apêndices.

Orientador: Prof. Alexandre Duarte Gusmão
Coorientador: Prof. Pedro Eugênio Silva de Oliveira

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade
de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

1. Análise de Recalques. 2. Reforço de Fundação.
3. Projeto de Fundação. I. Construção Civil – Dissertação.
II. Gusmão, Alexandre Duarte (orient.). III. Oliveira, Pedro
Eugênio Silva de (coorient.). IV. Universidade de
Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção
Civil. V. Título.

CDD: 690.028 – 23. ed.
Eliane Leitão – CRB4/827

INÊZ PRAZERES VIRGÍNIO

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE EDIFÍCIOS SUBMETIDOS A
REFORÇO DE FUNDAÇÕES**

BANCA EXAMINADORA:

Orientador

Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Universidade de Pernambuco

Coorientador

Prof. Dr. Pedro Eugenio Silva de Oliveira
Universidade Católica de Pernambuco

Examinadores

Profa. Dra. Márcia Rejane Oliveira Barros
Carvalho Macedo
Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. Fábio Lopes Soares
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Maurício Martines Sales
Universidade Federal de Goiás

Recife-PE
2024

RESUMO

A incerteza que existe sobre o solo é um desafio para profissionais de engenharia na hora de elaborar projetos de fundações, pois podem acarretar erros determinantes e problemas durante e após a construção de edificações. Algumas edificações apresentam recalques excessivos, criando problemas estéticos, funcionais e estruturais, gerando desconforto, custos elevados e até mesmo colocando em risco a vida das pessoas. Dentro desse contexto, a presente dissertação tem como objetivo avaliar um modelo proposto por Gusmão (2006) para previsão do recalque de edifícios antes, durante e após o reforço de fundação. O modelo consiste em um conjunto de equações lineares (trecho A e B) e exponencial (trecho C) e é definido em função dos parâmetros μ (razão entre a velocidade do trecho B e A) e λ (expoente do trecho C). Para isto foram escolhidos como objetos do estudo dois edifícios, A e B, que tiveram suas fundações reforçadas com microestacas injetadas autoperfurantes e estacas raiz, respectivamente. A metodologia aplicada baseou-se em analisar os recalques medidos e comparar com os resultados encontrados através da curva ajustada gerada com a aplicação do modelo. Os resultados mostraram que o modelo se adequa bem à curva de recalques medidos nas obras. O edifício A estabilizou mais devagar e o edifício B mais rápido. Para os dois edifícios estudados, observou-se que durante a execução de estacas a velocidade de recalque aumentou, isto foi encontrado através de μ , que apresentou valores maiores que 1 em aproximadamente 95,2% dos pilares aplicados. Para o edifício A e B foram encontrados os valores 3,21 e 1,73 respectivamente. Os valores de λ para o edifício A e B, foram de 0,00056 e 0,0589, respectivamente, sendo o edifício B, que apresentou valor consideravelmente maior, o mais rápido a recalcar. Dessa forma foi possível observar que os recalques aumentam durante o reforço, e que características como ordem de incorporação e tipo de reforço influenciam nessas velocidades. O trabalho contribui ao iniciar um banco de dados acerca dos parâmetros μ e λ para obras de reforço de fundação.

Palavras-chave: Análise de recalques. Reforço de fundação. Projeto de fundação

ABSTRACT

The uncertainty about the soil is a challenge for engineers when it comes to elaborating foundation designs, because it leads to significant errors resulting in complications during and after the building's construction. Some edifications show an excessive settlement, creating esthetical, functional and structural damage, bringing discomfort, expensive costs, and even putting people's lives at risk. In this context, the present dissertation aims to evaluate a model proposed by Alexandre Duarte Gusmão to predict the building settlement before, during and after a foundation reinforcement. The model consists of a set of linear equations (section A and B) and an exponential equation (section C) and is defined based on the parameters μ (ratio between the velocity of section B and A) and λ (exponent of section C). For this, two reinforced buildings, A and B, whose foundations were reinforced with self-drilling injected micropiles and root piles, respectively, were chosen as objects of study. The applied methodology was based on analyzing the measured settlements and comparing them with the results obtained through the adjusted curve generated by applying the model. The results have shown that the model fits well to the settlement curve measured on site. The building A stabilized more slowly, and building B stabilized faster. For both studied buildings, it was observed that during the pile driving process, the settlement rate increased, which was found through μ , which presented values greater than 1 in approximately 95.2% of the applied pillars. The values of μ for buildings A and B were 3.21 and 1.73, respectively. The λ values for buildings A and B were 0.00056 and 0.0589, respectively, with building B, which had a considerably higher value, being the faster one to settle. It was possible to observe that settlements increase during reinforcement, and characteristics such as incorporation order and type of reinforcement influence these velocities. The work contributes by initiating a database regarding the μ and λ parameters for foundation reinforcement projects.

Keywords: Settlement analysis. Foundation reinforcement. Foundation design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Detalhe da ponteira cortante com passagem para calda de cimento.....	23
Figura 2 - Fundação rígida (opção 2)	27
Figura 3 - Recalque diferencial no plano e fora do plano durante a linha de base e testes de estacas helicoidais (agitação 1).....	28
Figura 4 - Zonas de camadas sobrepostas na área de mineração (1 – zona cavada; 2 – zona de fratura; 3 – zona de deformação contínua).	29
Figura 5 – Variações do deslocamento máximo com mudança com cargas	30
Figura 6 – Fissuras devido ao recalque diferencial	31
Figura 7 – Estaca mega finalizada.....	32
Figura 8 – Fissuras presentes em um dos edifícios. (a) vigas ligadas aos pilares de um dos elevadores; (b) parede em alvenaria de um dos banheiros.	33
Figura 9 – Acompanhamento do recalque das edificações.....	35
Figura 10 – Desenho esquemático; (a) situação prévia da ponte; (b) situação após a execução das estacas mega.....	36
Figura 11 – Execução dos consolos para permitir a ação dos macacos	37
Figura 12- Estaca com corpo expensor (expander body)	39
Figura 13 – Curva do modelo conceitual.....	40
Figura 14 – Função linear ajustada no trecho A.....	41
Figura 15 – Função linear ajustada no trecho B	42
Figura 16 – Função linear ajustada no trecho C	43
Figura 17 – Ajuste linear da função exponencial	44
Figura 18 – Perspectiva do pavimento tipo e da estrutura.....	46
Figura 19 – Evolução dos recalques entre 1992 e 2002	47
Figura 20 – Sondagens de reconhecimento – lado oeste e lado leste	48
Figura 21 – Forma das sapatas	50
Figura 22 – Prova de carga vertical à compressão na estaca piloto	51
Figura 23 – Reforço da sapata SP9 (planta, cotas em centímetros)	52
Figura 24 – Reforço da sapata SP9 (corte).....	53
Figura 25 – Evolução dos recalques do edifício entre 2003 e 2008	54
Figura 26 – Curvas de iso-recalques da lâmina do prédio após o reforço (13/03/2008).....	55
Figura 27 – Obra do Hospital Universitário durante a construção	56

Figura 28 – Descrição dos blocos e das alas do hospital.....	57
Figura 29 – Descrição do bloco AIII.....	58
Figura 30 – Implosão da ala sul do hospital.....	59
Figura 31 – Perfil Geotécnico das sondagens realizadas próximo aos pilares P332, P323 e P305	60
Figura 32 – Perfil Geotécnico das sondagens realizadas próximo aos pilares P336, P335, P334, P333, P332, P331.....	60
Figura 33 – Planta das sapatas das linhas A e D.....	61
Figura 34 – Trincas existentes entre o pilar P335 e o bloco adjacente (primeiro andar).....	62
Figura 35 – Outra trinca existentes entre o pilar P335 e o bloco adjacente (primeiro andar) ..	62
Figura 36 – Trincas existentes na parede entre o P323 e P324 (segundo andar).....	63
Figura 37 – Esquema do bloco AIII e blocos adjacentes.....	64
Figura 38 – Planta de forma da sapata e bloco do P314 com estacas raiz de 410mm de diâmetro	65
Figura 39 – Equipamento de cravação das estacas raiz.....	66
Figura 40 – Planta de forma da sapata e bloco do P305 com estacas Mega de 310mm de diâmetro.....	67
Figura 41 – Console do reforço com estacas tipo Mega.....	68
Figura 42 – Execução das Estacas tipo Mega.....	69
Figura 43 – Estaca metálica depois de executado o encunhamento.....	69
Figura 44 – Recalque ao longo do tempo dos pilares P332, P314, P305 e P323.....	71
Figura 45 – Recalque ao longo do tempo dos pilares P306, P313, P324 e P333.....	73
Figura 46 – Recalque ao longo do tempo dos pilares P331, P322, P313 e P304.....	74
Figura 47 – Curvas dos recalques medidos do P1 a P8 de 2003 a 2008.....	85
Figura 48 – Curvas dos recalques medidos do P9 a P18 de 2003 a 2008.....	86
Figura 49 – Curvas dos recalques medidos do P1 a P8 de 2003 a 2020.....	87
Figura 50 – Curvas dos recalques medidos do P9 a P18 de 2003 a 2020.....	87
Figura 51 – Velocidade dos recalques medidos do P1 a P8 de 2003 a 2008.....	88
Figura 52 – Velocidades dos recalques medidos do P9 a P18 de 2003 a 2008.....	89
Figura 53 – Velocidades dos recalques medidos do P1 a P8 de 2003 a 2020.....	90
Figura 54 – Velocidades dos recalques medidos do P9 a P18 de 2003 a 2020.....	90
Figura 55 – Tempo x recalque do trecho A para o P1.....	92
Figura 56 – Tempo x recalque do trecho B para o P1.....	93
Figura 57 – Tempo x $-\ln(S_3 - S)/(S_3 - S_2)$	95

Figura 58 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o P1	97
Figura 59 – Curvas dos recalques medidos do P314, P332, P305, P323 do período medido	102
Figura 60 – Velocidade dos recalques medidos do P314, P332, P305, P323 do período medido	103
Figura 61 – Tempo x recalque do trecho A para o P305.....	104
Figura 62 – Tempo x recalque do trecho B para o P305	105
Figura 63 – Tempo x $-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$	107
Figura 64 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o P305	109
Figura 65 – Tempo x recalque do trecho A para o P2.....	133
Figura 66 – Tempo x recalque do trecho B para o P2	134
Figura 67 – Tempo x $-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$	136
Figura 68 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o P2	138
Figura 69 – Tempo x recalque do trecho A para o P11	139
Figura 70 – Tempo x recalque do trecho B para o P11	140
Figura 71 – Tempo x $-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$	142
Figura 72 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o P11	144
Figura 73 – Tempo x recalque do trecho A para o P18.....	145
Figura 74 – Tempo x recalque do trecho B para o P18	146
Figura 75 – Tempo x $-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$	148
Figura 76 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o P18	150
Figura 77 – Tempo x recalque do trecho A da média de pilares (P1 a P18).....	151
Figura 78 – Tempo x recalque do trecho B da média de pilares (P1 a P18)	152
Figura 79 – Tempo x $-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$	154
Figura 80 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para média de pilares (P1 a P18)	156
Figura 81 – Tempo x recalque do trecho A do pilar P314	157
Figura 82 – Tempo x recalque do trecho B do pilar P314	158
Figura 83 – Tempo x $-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$	160
Figura 84 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o pilar P314.....	162
Figura 85 – Tempo x recalque do trecho B do pilar P332.....	163
Figura 86 – Tempo x $-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$	166
Figura 87 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o pilar P332.....	168
Figura 88 – Tempo x recalque do trecho A do pilar P323	169
Figura 89 – Tempo x recalque do trecho B do pilar P323.....	170
Figura 90 – Tempo x $-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$	172

Figura 91 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o pilar P323	174
Figura 92 – Tempo x recalque do trecho B da média de pilares (P314, P332, P305, P323)..	175
Figura 93 – Tempo x $-\ln (S_3- S) / (S_3-S_2)$	177
Figura 94 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para média de pilares (P314, P332, P305, P323)	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos encontrados na literatura sobre reforço de fundações.....	24
Tabela 2 – Medições de recalque do P1 antes da execução de estacas	77
Tabela 3 – Medições de recalque do P1 a partir da execução da primeira estaca até a medição antes da incorporação	78
Tabela 4 – Medições de recalque do P305 antes da execução de estacas	81
Tabela 5– Medições de recalque do P305 a partir da execução da primeira estaca até a medição antes da incorporação	82
Tabela 6 – Regressão linear do trecho C do P1	93
Tabela 7 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C do P1	95
Tabela 8 – Regressão linear do trecho C do P305	106
Tabela 9 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C do P305	107
Tabela 10 – Regressão linear do trecho C do P2.....	135
Tabela 11 -Valores para elaboração do gráfico do trecho C do P2	136
Tabela 12 – Regressão linear do trecho C do P11	140
Tabela 13 -Valores para elaboração do gráfico do trecho C do P11	142
Tabela 14 – Regressão linear do trecho C do P18.....	146
Tabela 15 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C do P18	149
Tabela 16 – Regressão linear do trecho C da média de pilares (P1 a P18).....	152
Tabela 17 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C da média de pilares (P1 a P18)	155
Tabela 18 – Regressão linear do trecho C do pilar P314	158
Tabela 19 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C do pilar P314	161
Tabela 20 – Regressão linear do trecho C da média de pilares (P332).....	164
Tabela 21 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C do pilar P332	166
Tabela 22 – Regressão linear do trecho C do pilar P323	171
Tabela 23 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C do pilar P323	172
Tabela 24 – Regressão linear do trecho C da média de pilares (P314, P332, P305, P323) ...	176
Tabela 25 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C da média de pilares (P314, P332, P305, P323)	177

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Informações das estacas e blocos de reforço da fundação.....	53
Quadro 2-Cargas nos pilares.....	64
Quadro 3-Datas das etapas de reforço em cada pilar.....	70
Quadro 4- Resumo dos recalques medidos dos pilares P332, P314, P323, P305	72
Quadro 5 - Resumo dos recalques medidos dos pilares P306, P313, P324, P333, P331, P322, P313 e P304.....	75
Quadro 6 – Valores de velocidade do trecho A e B (P1 a P8), fator μ , e média.....	98
Quadro 7 – Valores de velocidade do trecho A e B (P9 a P18), fator μ , e média.....	99
Quadro 8 – Valores de velocidade do trecho A e B (P1, P2, P11 e P18), fator μ , λ e média.	101
Quadro 9 – Valores de velocidade do trecho A e B (P305, P314, P332, P323, média de todos pilares), fator μ , λ	110
Quadro 10 – Resumo de informações gerais do reforço de fundação dos edifícios A e B	111
Quadro 11– Comparação de variáveis dos edifícios A e B	112

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ECP	Estacas de Concreto Protendido
NBR	Norma Brasileira
OAE	Obras de Artes Especiais
SPT	Standard Penetration Testing
TV	Televisão
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Dimensão
S	Recalque	mm
S ₁	Recalque no início da execução de estacas	mm
S ₂	Recalque após a incorporação	mm
S ₃	Recalque final após a estabilização	mm
V _a	Velocidade do trecho A	mm/dia
V _b	Velocidade do trecho B	mm/dia
t	Tempo	dia
t ₁	Tempo no final do trecho A	dia
t ₂	Tempo no final do trecho B	dia
t ₃	Tempo no final do trecho C	dia
Δt	Variação de tempo	dias
μ	Fator de execução das estacas	
λ	Coefficiente angular no trecho C	t ⁻¹

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações iniciais	16
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos	17
1.3.1	<i>Geral</i>	17
1.3.2	<i>Específicos</i>	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Conceitos básicos	18
2.2	Manifestação patológica de fundação	19
2.3	Reforço de fundação	21
3	MODELO PROPOSTO POR GUSMÃO (2006)	40
4	CARACTERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS COM REFORÇO DE FUNDAÇÃO A SEREM ANALISADOS	46
4.1	Descrição do edifício A e reforço de fundação realizado	46
4.2	Descrição do edifício B e reforço de fundação realizado	56
5	METODOLOGIA	76
5.1	Edifício A	76
5.1.1	<i>Aplicação do modelo para a sapata do P1</i>	77
5.1.2	<i>Aplicação do modelo para a sapata do P2, P11, P18 e para o valor médio de recalque do P1 a P18</i>	79
5.2	Edifício B	80
5.2.1	<i>Aplicação do modelo para a sapata do P305</i>	80
5.2.2	<i>Aplicação do modelo para a sapata do P314, P332, P323 e para o valor médio de recalque do P305 a P332</i>	84
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
6.1	Edifício A	85
6.1.1	<i>Resultados para a sapata do P1</i>	91
6.1.2	<i>Resultados para a sapata do P2, P8, P11, P18 e média dos pilares (P1 a P18)</i>	97
6.1.3	<i>Comparações e análises do Edifício A</i>	98
6.2	Edifício B	102
6.2.1	<i>Resultados para a sapata do P305</i>	104
6.2.2	<i>Resultados para a sapata do P314, P332, P323 e média de todos pilares</i>	109
6.2.3	<i>Comparações e análises do Edifício B</i>	110

6.3	Apresentação e análise do edifício A e B.....	111
7	CONCLUSÕES.....	113
7.1	Edifício A.....	113
7.2	Edifício B.....	113
7.3	Comparando os resultados do edifício A e edifício B.....	114
8	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	115
	REFERÊNCIAS.....	116
	APÊNDICE A – Quadro de recalques do Edifício A.....	119
	APÊNDICE B - Quadro de velocidades de recalques do Edifício A.....	122
	APÊNDICE C - Quadro de velocidades de recalques do Edifício B.....	125
	APÊNDICE D - Quadro de velocidades de recalques do Edifício B.....	129
	APÊNDICE E – Resultados de aplicação do modelo para os pilares P2, P11, P18, P314, P332, P323, média dos pilares (P1 a P18) e média dos pilares (P314, P332, P305 e P323).....	133
	APÊNDICE F – Cronograma de execução do reforço do Edifício A.....	180
	APÊNDICE G – Cronograma de execução do reforço do Edifício B.....	181

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O estudo de um problema de fundações realiza-se a partir da definição das solicitações ou cargas de projeto e de um modelo de subsolo alcançado após a investigação geotécnica. Essas informações são concebidas através do que se conhece sobre a conduta do solo sobre carga ou da transferência de esforços para massa de solo. Como o solo é resultado da natureza, ele apresenta alta variabilidade de ocorrência e características. As construções atuais calculam suas soluções tomando valores de propriedades representativas dos materiais envolvidos no problema. Em muitos casos, o processamento probabilístico tem vantagens significativas na avaliação de segurança, mas é necessariamente acompanhado de análises mais complexas. (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2008).

Para monitorar os deslocamentos durante o carregamento da fundação, é essencial uma interação eficaz entre a empresa de sondagem, o projetista e a construtora. Essa colaboração permite que, tanto durante quanto após a execução da obra, sejam tomadas decisões e medidas fundamentais em tempo hábil, visando garantir uma perfeita consonância entre o que foi planejado e o que está sendo construído. Isso inclui a comparação constante dos valores de recalques estimados com os recalques efetivamente observados durante e após a construção. A medição de recalque possibilita a investigação e a avaliação do desempenho e da segurança do sistema composto pela superestrutura, fundações e solo (DE SEIXAS; DE SEIXAS; DE SEIXAS, 2009).

1.2 Justificativa

As construções de edificações, em geral, abrangem inúmeras atividades que são desempenhadas por profissionais com diferentes formações e experiências. O sucesso ou fracasso de uma fundação, bem como a possibilidade de aparecimento de problemas, pode surgir ou mesmo depender de uma imensa variedade de aspectos, algum deles considerados como detalhes ou menos significativos. Os profissionais responsáveis pela etapa de caracterização do solo, não costumam ser especialistas em fundações, não acompanham o evoluir de todas as fases que dão origem às fundações executadas. Condições comportamentais especiais ou materiais anômalos

podem não ser identificados nesta fase; os projetistas de fundações geralmente não recebem informações precisas sobre eventos ou condições locais ou construtivas; mudanças das condições encontradas podem não ser necessariamente relatados; os executores podem não conseguir obter detalhes de investigações preliminares ou especificações de execução suficientes para realizar a obra; dificuldades construtivas podem prejudicar as condições dos projetos estabelecidos; eventos após a construção da fundação, dentro ou fora da obra, podem afetar seu desempenho, enquanto não previsto no conceito e projeto, e finalmente a degradação dos elementos de fundação pode afetar seu desempenho a longo prazo (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2008).

Quando os edifícios começam a recalcar e apresentam um recalque diferencial muito alto surge a necessidade de fazer um reforço de fundação. Quando é iniciado o reforço, a velocidade de recalque da fundação aumenta consideravelmente, o que gera certo desespero, pois não se sabe quando esse recalque vai estabilizar. Não existe um banco de dados relatando sobre esse aumento de recalque durante fundações, não há muitos trabalhos publicados sobre reforço de fundações, obras com mau desempenho não são publicadas e não há livros publicados sobre reforço de fundação. O presente trabalho busca discutir essas questões. O modelo a ser analisado nesse trabalho nunca foi publicado e não existe outro modelo de previsão de recalque conhecido para fazer comparações.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Avaliar o modelo de Gusmão (2006) para previsão do recalque de edifícios antes, durante e após o reforço de fundação.

1.3.2 Específicos

- Apresentar o modelo proposto por Gusmão (2006);
- Aplicar o modelo para dois edifícios que tiveram reforço de fundação;
- Propor parâmetros para projeto de reforço de fundações.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos básicos

O solo é um agente importante na interação com a fundação. Notado que as fundações lançam suas cargas no solo, que geram uma resposta, gerando tensões que levam a deformações. E se tratando de construções civis, este desempenho interfere, tanto na fase de criação do projeto como na execução de fundações (COELHO; OLIVEIRA, 2019).

Segundo a NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022, p.8-9) deve ser feita antes de tudo um reconhecimento inicial do local, e durante uma visita reconhecer feições topográficas, eventuais indícios de instabilidade de taludes, aterros, contaminação do subsolo por material contaminante ou decorrente de alguma ocupação anterior e estado das construções vizinhas. Depois disso é necessário realizar uma investigação geotécnica preliminar, independentemente do tipo de edificação que será construída. Deve ser realizada no mínimo sondagens a percussão (com SPT) para determinar a posição do nível da água, medida do índice de resistência à penetração, estratigrafia e classificação dos solos.

Depois dessa investigação pode ser necessário uma investigação geotécnica complementar através da execução de sondagem adicionais e outros ensaios de campo e de laboratório. Essas investigações adicionais devem ser feitas sempre que forem encontradas diferenças no local da obra entre as condições fornecidas pela investigação preliminar com a intenção de sanar e esclarecer quaisquer divergências. Quanto à segurança da fundação, a norma estipula que a sensibilidade da estrutura à deformação da fundação deve ser levada em consideração. As estruturas sensíveis ao recalque devem ser analisadas levando em consideração as interações solo-estrutura.

O projeto deve garantir que a fundação esteja segura no estado limite último associados, colapso parcial ou total da construção, e o estado limite de serviço quando acontecem fissura e deformações que afetam o uso da obra. Cada tipo de fundação (fundação direta ou fundação profunda) possui um fator de segurança diferente. Para valores limites de projeto para deslocamentos e deformações nas fundações deve-se considerar: a confiabilidade com qual os valores dos deslocamentos aceitáveis podem ser estabelecidos, a velocidade dos recalques em movimentos do terreno de fundação, tipo de estrutura em material de construção, tipo de fundação, natureza do solo, finalidade da obra e influência nas estruturas e edificações vizinhas.

2.2 Manifestação patológica de fundação

Segundo Milititsky, Consoli e Schnaid (2008), o conceito de solicitações deve abranger a importância do comportamento do próprio solo (empuxo, atrito negativo e outros), não apenas as cargas permanentes e acidentais geradas pela superestrutura, que persistem ao longo da construção, uso e vida útil da estrutura. Os problemas que surgem nessa fase da fundação serão mostrados nas seguintes categorias:

a. Relativos ao solo: apresentação das patologias envolvendo o solo como o gerador do problema;

A etapa de análise e projeto produz muitos problemas envolvendo o comportamento do solo, que devem ser realizados por avaliação de desempenho e estimativa de parâmetros de engenharia por profissionais especializados e experientes. Exemplos típicos desses problemas: adotar um perfil de projeto sem descrever adequadamente todas as condições representativas do subsolo, como a localização de camadas menos resistentes ou compressíveis e a presença de lençóis freáticos; reprodução impropria da reação do solo pelo uso de correlações empíricas ou científicas não aplicáveis ao cenário em questão; erros na estimativa dos atributos de comportamento do solo por extrapolação desajustada da faixa de ocorrência da correlação, resultando em valores demasiado altos ou baixos mas não apropriados a situação analisada, etc.

b. Relativos a mecanismos: falhas devido à falta de identificação de mecanismo causador de manifestações patológicas;

Quando uma fundação transmite a carga ao solo e esse movimento é considerado de maneira separada, a existência de outra solicitação altera as tensões na massa de solo. Nas conjunções em que acontece sobreposição de esforços de fundação superficiais no solo sem análise apropriada de seu efeito, os resultados obtidos na análise não são representativos. Os esforços sobrepostos podem ser originados na obra sendo projetada ou casualmente produzidos pela implantação que aconteceu depois da edificação de uma estrutura já existente. Por exemplo, um conjunto de estacas apoiadas em uma camada fina, sobreposta a uma camada de argila mole, pode romper quando a análise da capacidade de carga ignora a camada de solo mole abaixo da ponta das estacas. Por outro lado, onde se verifica apenas a capacidade de carga, uma análise de recalque, sem estudo da camada compressível inferior, pode resultar em recalques incompatíveis com a estrutura, devido ao aumento da tensão causado pelo grupo de estacas.

c. Relativo ao desconhecimento do desempenho verdadeiro das fundações: cada tipo de fundação gera cargas que deformam, e se comportam de maneira específica, o que abala a performance da estrutura estabelecida sobre as mesmas;

A utilização de diferentes sistemas de fundações em uma mesma estrutura, devido à natureza da variação de carga, variação da profundidade do subsolo resistente, ou limitações das condições de acesso locais, sem separação por juntas comportamentais ou observação pertinente a compatibilidade de assentamentos de diferentes fundações. Esse tipo de procedimento acaba levando a recalques diferenciais e danos estruturais. Valores de capacidade de carga de fundações profundas obtidos por correlação com testes de penetração, sem observar os números limites de atrito lateral e resistência de ponta, escalando para valores altos impossíveis ou profundidades de elementos de fundação. Os resultados obtidos não coincidiram com os resultados reais, fazendo com que a fundação suportasse uma carga maior do que poderia ser transferida para o solo (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2008).

d. Relativos à estrutura de fundação: avarias que tem como causa o projeto ou detalhamento estrutural do elemento de fundação;

A determinação de erros de carga atuando em fundações, normalmente acontecem em pequenas obras que não são adequadamente projetadas, ou projetistas que não possuem experiência em situações específicas, como estruturas pré-fabricadas, obras de arte, indústria, silos, torres altas, sujeitas a efeitos dinâmicos ou choques. Um exemplo é quando acontece alguns erros de dimensionamento de fundação, vigas de equilíbrio, estacas insuficientemente reforçadas para cargas horizontais, vigas de alta rigidez calculadas como vigas contínuas, blocos mal dimensionados resultando em uma distribuição desigual.

e. Relacionados às especificações construtivas ou a falta delas

Critérios de projeto devem ser obedecidos para fundações diretas e fundações profundas. Nas fundações diretas, o problema pode ser devido à falta de instruções precisas sobre o nível de assentamento da fundação, o tipo e as características do solo sobre o qual a fundação será lançada, a ordem de execução no caso de elementos adjacentes em diferentes níveis, etc. Em fundações profundas, é habitual acontecerem adversidades devido à falta de referências a profundidades mínimas do projeto, peso mínimo ou características do martelo de cravação, bem como nega das estacas, detalhes de emenda, tensão e propriedades dos materiais das estacas, entre outros.

f. Fundações sobre aterros

A execução de fundações em aterros constitui uma fonte significativa de problemas, causados por aspectos particulares do assunto. Especialistas não geotécnicos normalmente não consideram esses aspectos em projetos devido à falta de compreensão dos mecanismos envolvidos. Além dos aspectos usuais inerentes a qualquer fundação, as fundações apoiadas em aterros possuem características únicas relacionadas aos recalques a que serão submetidas. Recalques de fundações sobre aterros podem acontecer por três motivos diferentes: deformações devido ao peso próprio do aterro e carregamento sobre ele, deformações no solo natural abaixo do aterro e por causa de agentes bioquímicos que alteram o solo em lixões (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2008).

2.3 Reforço de fundação

O reforço estrutural em fundações é uma medida corretiva aplicada ao sistema de interação-fundação de uma estrutura já existente, com o objetivo de recuperar a segurança, melhorar o desempenho ou atender a novas demandas. Essa intervenção torna-se necessária quando as fundações existentes não funcionam adequadamente, não suportando as cargas aplicadas, ou quando ocorre um aumento significativo do carregamento que não pode ser sustentado sem oferecer riscos e comprometer a estrutura. Nesses casos, podem surgir deformações inadequadas, reduzindo os coeficientes de segurança (HACHICH, 1998).

Seguem alguns tipos de estacas para reforço de fundações:

- Estaca raiz

Conforme a NBR 6122 (2010), a estaca raiz é uma estaca escavada com diâmetro pequeno, moldada no local da construção. Todo o furo é revestido, em solo, por meio de segmentos de tubos metálicos (revestimento) que vão sendo rosqueados à medida acontece a perfuração e os segmentos utilizados no revestimento são recuperados.

A estaca raiz é reforçada em todo o seu comprimento e o furo é preenchido com argamassa. Segundo Velloso e Lopes (2012), as estacas desse tipo foram originalmente desenvolvidas para conter taludes quando cravadas formando reticulado, sendo então utilizadas como reforço de fundação antes de serem utilizadas como fundações ordinárias. Estacas como essas possuem uma peculiaridade que permite que sejam utilizadas onde outras estacas não podem: não geram choques ou vibrações, podem atravessar rochas ou blocos de concreto e, geralmente, os equipamentos de execução são pequenos. Isso permite que as estacas sejam construídas onde o espaço é limitado, bem como na vertical ou em qualquer inclinação, tornando-se um dos principais tipos de fundações para reforço.

- Estaca Mega

Apesar de ser amplamente utilizada na construção civil, a estaca MEGA é um assunto da geotecnia relativamente pouco divulgado em congressos e seminários. Como a sua utilização geralmente envolve problemas em construções, na maior parte das vezes causados por erros de projeto ou de execução, os responsáveis pelas obras não se sentem a vontade em tornar público a sua utilização (DONADON, 2009).

Dentre os benefícios das estacas prensadas destacam-se: a alternativa de execução em locais pequenos e com pouco espaço, com circulação difícil a pessoas e equipamentos, ausência de vibrações durante a cravação, sincronia ao uso da edificação, Aumento da segurança durante o trabalho e a limpeza durante a operação, pois não é usada água no processo (PEREIRA; LUCENA; CARMO, 2021).

- Estaca injetadas autoperfurantes

As estacas injetadas autoperfurantes são estacas de pequeno diâmetro moldadas no local que envolvem a perfuração de um furo no solo a uma velocidade muito alta, girando enquanto reveste ao mesmo tempo. A injeção da pasta de cimento ocorre no tubo oco (direção descendente), há um refluxo (direção ascendente) entre a parte anelar formada na circunferência externa do tubo e a parede em contato com o solo.

A tecnologia é livre de vibração e abaixo do limite de ruído, requer apenas pequenos furos, reduz o tamanho do equipamento e a capacidade instalada, causando menos danos ao meio

ambiente. As operações são perdidas, evitando o trabalho de remover tubos de encamisamento e adição de barras de aço, como nos sistemas convencionais. Utilizar armação própria no furo confere a este tipo de estaca a característica de mínima perturbação na fundação, muitas vezes dobrando a produtividade quando se utiliza revestimento encamisado. Esse recurso representa um atrativo a mais, principalmente em situações complexas de perturbação urbana, além da velocidade de execução, muitas vezes dobrando a produtividade, exigindo uma equipe mínima de encarregado, operadores de perfuração, injetador e auxiliares (práticos e gerais). A autoperfuração com nata de alta resistência leva a um aumento da capacidade de carga da estaca tubular. O corpo formado por calda de cimento assegura uma interação radial da barra de ancoragem no solo e também oferece alta proteção contra a corrosão (SILVA, 2017). A Figura 1 mostra uma ponteira utilizada para perfuração.

Figura 1- Detalhe da ponteira cortante com passagem para calda de cimento



Fonte: Silva *et al.* (2021)

Na literatura há registro de alguns estudos relacionados a patologias de fundações e suas soluções de reforço. A Tabela 1 apresenta um resumo dos estudos encontrados com informações sobre os autores, o local e ano de publicação, tipo de edificação, causas e solução de reforço adotada. Alguns desses trabalhos foram encontrados no portal de periódicos da Capes, onde foi realizada uma busca com palavras-chave, como: foundation, reinforcement, building, differential settlement, micropiles. Outras pesquisas foram realizadas no Google acadêmico, onde foram encontrados teses, dissertações e artigos publicados em congressos, também utilizando as mesmas palavras-chave em português e inglês, sem nenhum período de tempo estabelecido, podendo ser publicado em qualquer ano. O material foi analisado e o que se adequou ao tema de reforço de fundações foi adicionado a tabela.

Tabela 1. Trabalhos encontrados na literatura sobre reforço de fundações

(Continua)

Nº	Autores	Local e ano	Tipologia da edificação	Objetivo	Resultados
1	Xiuping	China, 2020	Edifício escolar	Dentre três tipos de soluções de reforço, escolher a melhor solução.	A solução foi a reestruturação da fundação original em fundação rígida com viga de fundação adicional.
2	Orang <i>et al.</i>	EUA, 2021	Edifícios no geral	Realizar avaliação da aplicação de estacas helicoidais para diminuir o recalque de fundações induzido por liquefação e observar seu desempenho sísmico em terrenos liquefeitos.	A fundação suportada por estacas helicoidais é pouco afetada pelo assentamento da fundação e diferentes inclinações. O mecanismo de recalque causado pela liquefação pós-vibração não afeta o recalque da fundação de estacas helicoidais.
3	Guo <i>et al.</i>	China, 2021	Edifício	Descrever um estudo de caso realizado na fundação de um edifício grande que iria ser construído em uma área de lotes de mineração, com fraturas no maciço rochoso.	O resultado mostrou que a solução adotada ampliou a estabilidade da fundação e apresentou que é viável em termos de segurança de grandes edifícios construídos sobre essas áreas.
4	Zhou <i>et al.</i>	China, 2020	Aterro	Propõem um novo esquema para o reforço de fundações de aterro com estacas de tubos de concreto protendido (ECP) inclinados em vez de verticais.	As estacas tubulares de concreto protendido inclinadas em maiores ângulos são ideais para melhorar a estabilidade geral da fundação.
5	Silva A., Silva W. e Bertequini	Brasil, 2018	Residência com fundação reforçada com estaca mega	Apresentar um estudo de caso de uma casa que apresentou fissuras. Descrever as possíveis causas das manifestações e descrever a solução.	Após a apresentação do estudo de caso, pode-se concluir que a importância da realização de investigações geotécnicas e análises de solos antes e durante a construção de edifícios, acompanhadas por profissionais capacitados.

(Continua)

Nº	Autores	Local e ano	Tipologia da edificação	Objetivo	Resultados
6	Rêbello, Danziger e Dias	Brasil, 2019	Conjunto de prédios	Descrever e analisar soluções de reforços de fundações empregadas em um conjunto de prédios com fundação originais em estacas pré-moldadas	Concluí-se que a rigidez dos elementos de fundação deve ser levada em consideração na avaliação da distribuição de cargas entre os elementos de fundação.
7	Santos Júnior	Portugal, 2018	Edifício	Propõe estudar dois métodos diferentes de dimensionamento de colunas de jet grouting, são eles: o método Bustamante 2002 e o método de microestacas, que são aplicados para determinar o dimensionamento de colunas de jet grouting que foram utilizadas como reforço de uma fundação de um edifício sobre solo mole.	Desta forma, foi possível estudar qual o método de cálculo mais próximo da coluna de jet grouting executada nessa obra. Todos os dados utilizados neste estudo de caso foram coletados em conjunto com a empresa responsável pelo reforço das fundações das edificações estudadas.
8	Pereira, Lucena, Carmo	Brasil, 2021	Ponte	Discutir as manifestações patológicas comuns causadas pela vibração excessiva da estrutura e ajudar a ampliar o conhecimento sobre o uso de estacas mega como reforço estrutural obras de artes especiais	O reforço com estaca mega foi bem sucedido. A rigidez estrutural adicionada após a instalação da estaca torna seu movimento imperceptível ao usuário.
9	Olavo, Gazda R. e Gazda M.	Brasil, 2017	Ponte	Descrever o caso do reforço de fundação da ponte Manoel Ribas, que tinha fundação direta e que apresentou recalque nas sapatas.	O reforço de fundações e renivelamento da ponte propiciou que a mesma fosse reaberta ao tráfego, facilitando o abastecimento da cidade de União da Vitória.

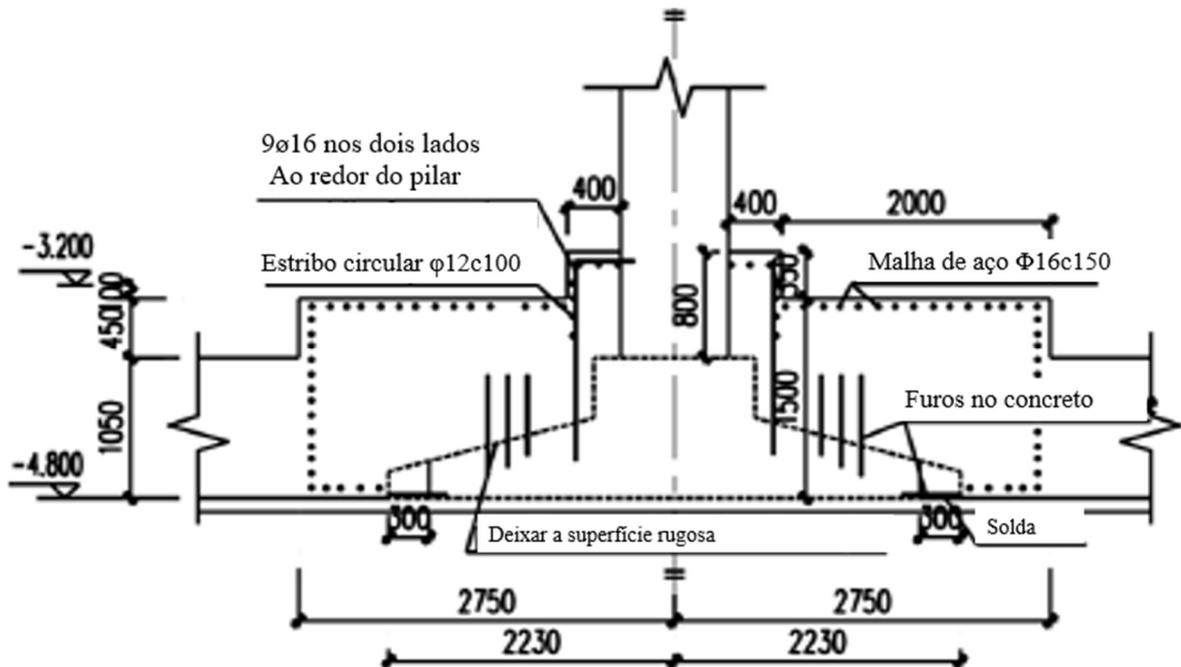
(Conclusão)

Nº	Autores	Local e ano	Tipologia da edificação	Objetivo	Resultados
10	Sales e Costa	Brasil, 1996	Edifício	Apresentar estudo de caso de dois reforços de fundações históricos.	O primeiro edifício que recalçava continuamente foi reforçado com uma viga de fundação e tubulões, utilizando concreto de alta resistência. O segundo edifício apresentou também recalques diferenciais e foi reforçado com encamisamento de pilares e estacas injetadas.
11	Broms	EUA, 185	Estacas	Apresentar um novo tipo de estaca.	Estaca com corpo expensor consiste em uma estaca que, após ser cravada, recebe uma chapa de aço dobrada em sua parte inferior. Essa chapa, chamada de corpo expensor, é inflada com argamassa de cimento, formando um bulbo na base da estaca. Esse processo aumenta a capacidade de carga da estaca, tornando-a mais eficiente para suportar o peso da estrutura.

Fonte: Autora (2022)

Xiuping (2020), em seu trabalho descreve uma edificação de concreto armado, construída em 2003, que depois de um determinado tempo precisou ser reforçada, devido à existência de um projeto de acréscimo de dois andares na edificação existente para serem construídos. Foram propostas três soluções, todas adequadas às alterações previstas no projeto: A opção 1 consistiu na adição de vigas longitudinais de fundação com fixadores e no alargamento das seções dos pilares ao longo da fundação. A opção 2 (Figura 2) visou transformar a fundação original em uma fundação rígida independente adicional que é ancorada à fundação por uma viga longitudinal adicional. Na opção 3, a fundação original seria perfurada com estacas pré-moldadas de 200x200 milímetros (mm) utilizando um dispositivo de ancoragem de estacas hidrostática com concreto para fixação do cabeçote.

Figura 2 - Fundação rígida (opção 2)



Fonte: Xiuping (2020)

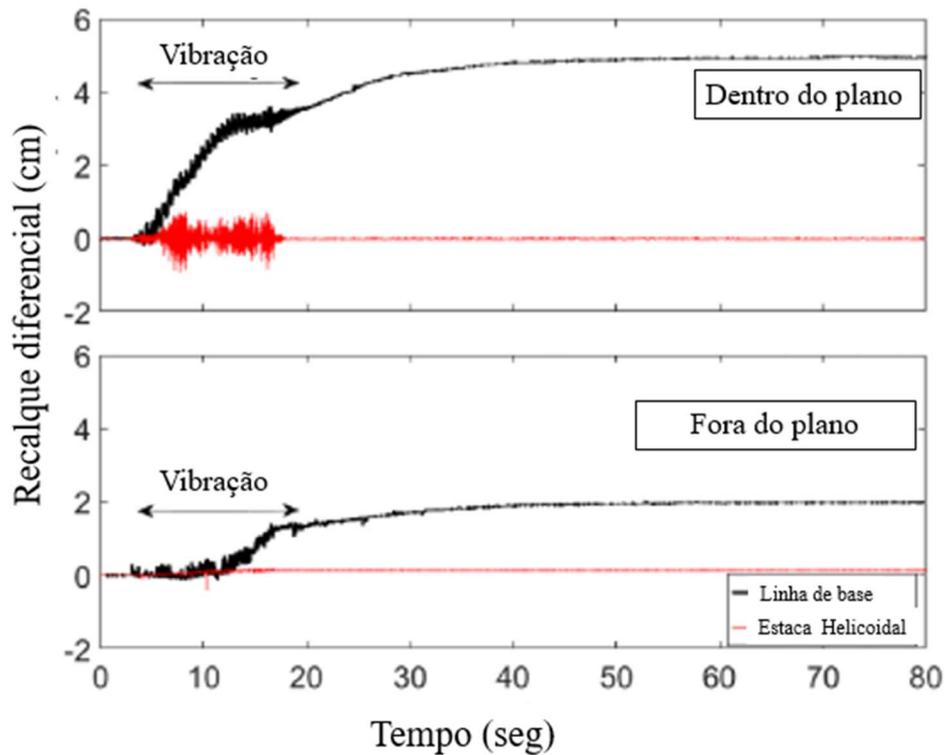
A opção 2 foi escolhida, pois a opção 1 tinha um longo período de execução e grande dificuldade, enquanto a opção 3 tem uma operação pequena e de alto custo.

Orang *et al.* (2021), com o objetivo de realizar uma avaliação da aplicação de estacas helicoidais para diminuir o recalque de fundações induzido por liquefação e observar seu desempenho sísmico em terrenos liquefeitos, executaram duas séries de testes de mesa de agitação em larga escala (teste de linha de base e teste de pilha helicoidal), na Universidade da Califórnia, San Diego. Cada modelo foi instrumentado e submetido a duas sequências de agitação aplicadas de forma consistente. Um total de 150 sensores foram usados na série de testes de pilha espiral.

Instrumentos semelhantes foram usados para ambas as séries de testes. Um total de 14 potenciômetros de corda também foram usados para capturar o deslocamento lateral. Os recalques de fundação e quase-fundação são medidos usando quatro linhas e quatro potenciômetros lineares localizados nos quatro cantos da fundação e no modelo de solo, respectivamente. Experimentos mostram que a geração de excesso de pressão de água nos poros ao redor da pilha helicoidal é reduzida, o que é atribuído principalmente à densificação ao redor das estacas durante a instalação. A fundação suportada por estacas helicoidais é pouco afetada (não sofreu recalque) pelo assentamento da fundação e diferentes inclinações, como é possível

perceber na Figura 3. O mecanismo de recalque causado pela liquefação pós-vibração não afeta o recalque da fundação de estacas helicoidais.

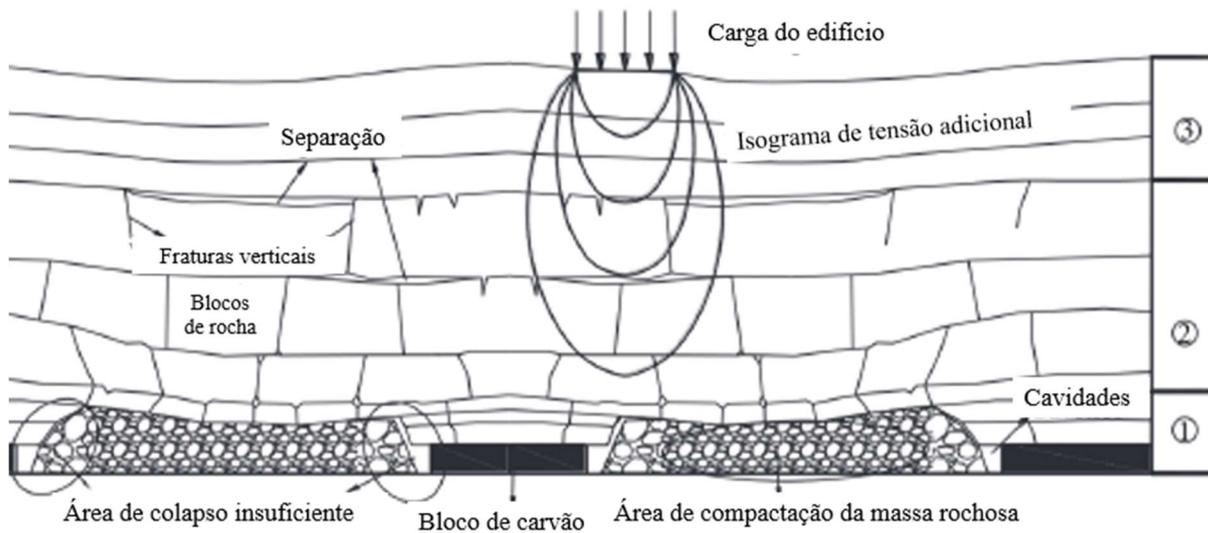
Figura 3 - Recalque diferencial no plano e fora do plano durante a linha de base e testes de estacas helicoidais (agitação 1).



Fonte: Orang *et al.* (2021)

Guo *et al.* (2021) estudaram uma área de lotes onde houve mineração em larga escala e de alta intensidade de recursos de carvão nas últimas décadas, onde havia edifícios danificados devido a deformação e instabilidade das camadas percebidas por meio de uma exploração geofísica eletromagnética. Neste trabalho, foi desenvolvido um esquema para construir um edifício grandioso de escritórios de 100 metros (m) de comprimento, 90 m de largura e 100 m de altura, em uma dessas áreas de mineração, em Huaibei, onde existem formações rochosas fraturadas e fraturas desenvolvidas. A Figura 4 apresenta essas cavidades e fraturas na área de mineração.

Figura 4 - Zonas de camadas sobrepostas na área de mineração (1 – zona cavada; 2 – zona de fratura; 3 – zona de deformação contínua).



Fonte: Guo *et al.* (2021)

Nessas áreas e fundações antigas realizou-se um reforço de grauteamento, e uma pasta é utilizada para cimentar as cavidades e fissuras na rocha circundante como um todo, o que melhora a capacidade de suporte e estabilidade da rocha, reduzindo a deformação da área de fundação. Dezoito furos foram projetados e 3 furos utilizaram furos de exploração anteriores. O cimento de escória e as cinzas volantes são usados como os principais materiais sólidos de rejunte. Um teste de imagem de TV de poço foi usado para visualizar toda a parede do poço para observar as fraturas do leito rochoso nos quatro poços de detecção.

De acordo com o reconhecimento e processamento da imagem, os resultados da taxa de preenchimento do furo de detecção superior a 85%. Foi realizado também um teste de injeção de água, e as taxas de permeabilidade dos poços se mostraram positivas quanto ao preenchimento das fraturas. A cota de profundidade das estacas foi de 50 m, e retratou boa estabilidade e grande capacidade de carga, e como consequência disso o recalque provocado pela compressão da camada quaternária de areia e solo, reduziu. A resistência do maciço rochoso aterrado e o material de aterro nas áreas de mineração suportaram a carga adicional transferida ao solo através das estacas, e a estabilidade das áreas foi alcançada.

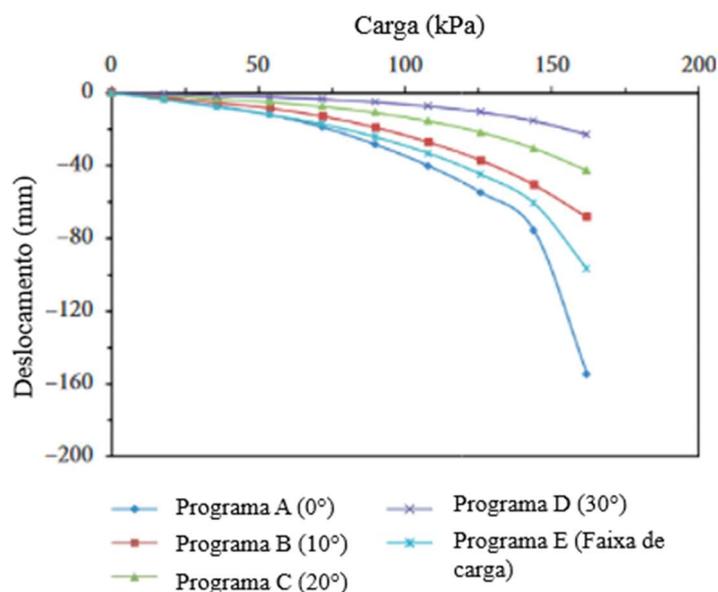
Zhou *et al.* (2020) propõem um novo esquema para o reforço de fundações de aterro com estacas de tubos de concreto protendido (ECP) inclinados em vez de verticais. Com base no acidente de engenharia real de colapso de taludes, esta pesquisa estabelece um modelo de elementos finitos e analisa as características de engenharia e o efeito do reforço da fundação. Neste estudo,

o modo de ruptura do talude apoiado por estacas na fundação do talude antes do colapso foi analisado através de investigação de campo. A partir dos dados medidos, foi estabelecido um modelo de análise de elementos finitos, foram comparados os efeitos de estacas ECP verticais, estacas ECP inclinadas e esquemas de reforço de carga de berma, e as características de deformação das estacas foram estudadas. Espera-se que os resultados deste estudo forneçam uma referência para a aplicação de engenharia deste novo esquema de reforço de fundação. Os resultados mostram que o deslocamento horizontal máximo da fundação está localizado na base do talude. Especificamente, o reforço com ECP inclinado e bermas de carregamentos contribui mais para o deslocamento horizontal máximo da fundação do que com estacas ECP verticais.

Além disso, o deslocamento horizontal máximo diminui rapidamente com o aumento do ângulo de inclinação, o que se correlaciona com o aumento da estabilidade lateral. Comparado com estacas de tubos de concreto protendido verticais e bermas de carregamento, o reforço de estacas de tubos de concreto protendido inclinados ajuda a reduzir o momento máximo de flexão do corpo da estaca e quanto maior é o ângulo de inclinação das estacas, maior é a contribuição. Portanto, as estacas tubulares de concreto protendido inclinadas em maiores ângulos são ideais para melhorar a estabilidade geral da fundação.

A Figura 5 apresenta valores diferentes de deslocamento máximo com ângulos de inclinação das estacas sob diferentes cargas de aterro.

Figura 5 – Variações do deslocamento máximo com mudança com cargas



Fonte: Zhou *et al.* (2020)

O deslocamento lateral máximo na base do aterro cresce com o carregamento em todos os programas. Portanto, pode-se inferir que as estacas ECP inclinadas têm uma contribuição significativa para melhorar a estabilidade lateral, capacidade de carga vertical e propriedades de tensão das estacas. Recomenda-se utilizar um ângulo de inclinação de 30° como valor ideal para o reforço da inclinação do aterro.

Silva A. S., Silva W. H. E Bertequini (2018) estudaram uma casa unifamiliar e uma área útil de 98,75 metros quadrados, em uma fazenda de cães localizada em São Paulo. Informações descobertas durante o estudo afirmam que antes da construção da casa havia um canil com muro de alvenaria de 1,5m no local. Depois de algum tempo de construção, a residência apresentou fissuras, apresentadas na Figura 6, em pontos específicos devido ao recalque diferencial, no local onde existia esse canil, deduzindo então que a casa foi construída sobre a mesma fundação, que não resistiu o peso da nova construção, então o reforço foi necessário.

Figura 6 – Fissuras devido ao recalque diferencial



Fonte: Silva A. S., Silva W. H. E Bertequini (2018)

Por necessidade de rapidez no serviço foi definido o uso de estacas mega. Foi realizada uma escavação de uma abertura com profundidade máxima de 1,5 m, esta abertura permite a escavação precisa do local até a fundação onde seriam inseridas, junto com os encaixes do macaco hidráulico, as estacas. Depois disso, o método selecionado é executado, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Estaca mega finalizada



Fonte: Silva A. S., Silva W. H. E Bertequini (2018)

Após a conclusão do reforço, a abertura é enterrada e compactada para preencher o vazio e evitar a possibilidade de recalque diferencial na área. Após a apresentação do estudo de caso, pode-se concluir que a importância da realização de investigações geotécnicas e análises de solos antes e durante a construção de edifícios, acompanhadas por profissionais capacitados, e após a identificação de patologias, é adequada e após isso, seja realizado um controle dos recalques e seja realizado reforços ou recuperação adequada.

Rêbello, Danziger e Dias (2019) descreveram e analisaram uma solução de reforço de fundação utilizada em um conjunto construtivo utilizando a fundação original em estacas pré-moldadas. O terreno tem 4 metros de aterro reforçado acima de uma camada de solo mole que tem 9 metros. Foram observadas fissuras em vigas próximas a um dos elevadores e na alvenaria de um banheiro do prédio, como observado na Figura 8.

Figura 8 – Fissuras presentes em um dos edifícios. (a) vigas ligadas aos pilares de um dos elevadores; (b) parede em alvenaria de um dos banheiros.



(a)



(b)

Fonte: Rêbello, Danziger e Dias (2019)

Para reforçar a fundação danificada, foram utilizadas duas soluções: estacas-raiz e estacas de amarração, cobertas por vigas, ou estacas-raiz ligadas por blocos elevados. Ambas as soluções possuem certas peculiaridades, dependendo da fundação a ser reforçada. As vigas que utilizam estacas raiz e tirantes são incorporadas à estrutura existente de duas maneiras: por chumbadores quando o bloco estivesse próximo a superfície ou junto ao pilar através de perfil metálico, quando o bloco estava mais profundo. No poço do elevador foi implementada uma terceira solução: foram realizadas estacas armadas no exterior dos pilares paredes existentes, rodeados por vigas de concreto armado. Os primeiros 18 m das estacas foram revestidos com tubos de PVC, com exceção de onde o comprimento era pouco menor.

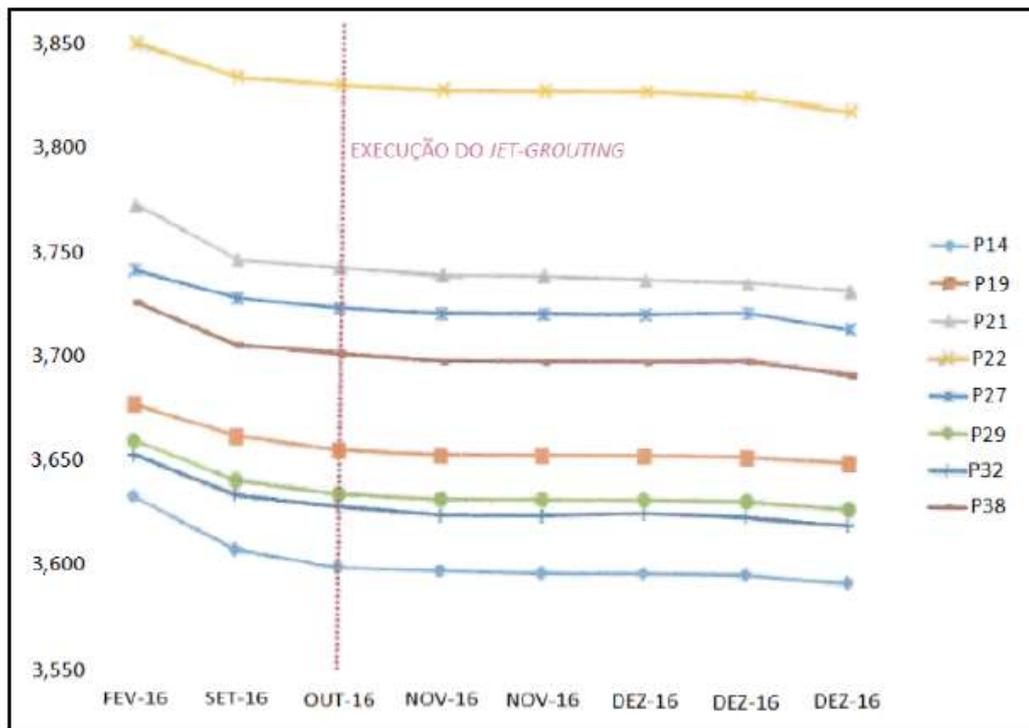
Os casos analisados admitem ou não a capacidade de absorção de carga das estacas originais e levam em consideração o atrito negativo das estacas originais e as estacas armadas atuantes ou não, e na estaca de reforço cada uma das situações possíveis criam uma distribuição diferentes de cargas entre os elementos de fundação a depender das cargas atuantes e quando e sistemas hiperestáticos, das rigidezes axiais das estacas e do tirante. A rigidezes axias também necessita da carga aplicada sendo fundamental processo seletivo nas situações diferentes táticas para definição das cargas atuantes em cada elemento de fundação e seus respectivos deslocamentos. Conclui-se que a rigidez dos elementos de fundação deve ser levada em consideração na avaliação da distribuição de cargas entre os elementos de fundação.

Santos Júnior (2018) propõe estudar dois métodos diferentes de dimensionamento de colunas de jet-grouting encontrados em referências internacionais, são eles: o Método Bustamante

(2002) e o método de microestacas, que são aplicados para determinar o dimensionamento de colunas de jet grouting que foram utilizadas como reforço de uma fundação de um edifício sobre solo mole. Além disso, são discutidas as principais manifestações patológicas que ocorrem em estruturas colocadas nesses solos, e descrito o processo de identificação e desenvolvimento patológico.

Por fim, foi realizada uma revisão abrangente da tecnologia de jet-grouting, descrevendo como esta técnica foi desenvolvida, os tipos e desenvolvimentos que existem atualmente no mercado. Neste estudo, foram avaliadas referências nacionais e internacionais para dimensionamento de colunas de jet-grouting, apontando as principais vantagens e desvantagens da técnica. A parte prática começou seu desenvolvimento com o projeto de colunas de jet-grouting para reforço da fundação de um edifício existente localizado na cidade de Marge, estado do Rio de Janeiro, Brasil, através de diferentes métodos encontrados na bibliografia. Concluídos os cálculos, o trabalho continuou com a discussão dos resultados, em que os resultados obtidos por diferentes métodos de cálculo foram comparados com os pilares de jet-grouting realizados para reforço das fundações dos edifícios existentes. Desta forma, foi possível estudar qual o método de cálculo mais próximo da coluna de jet-grouting executada nessa obra. Todos os dados utilizados neste estudo de caso foram coletados em conjunto com a empresa responsável pelo reforço das fundações das edificações estudadas. Na Figura 9 é possível observar a estabilização do recalque após a execução do reforço.

Figura 9 – Acompanhamento do recalque das edificações

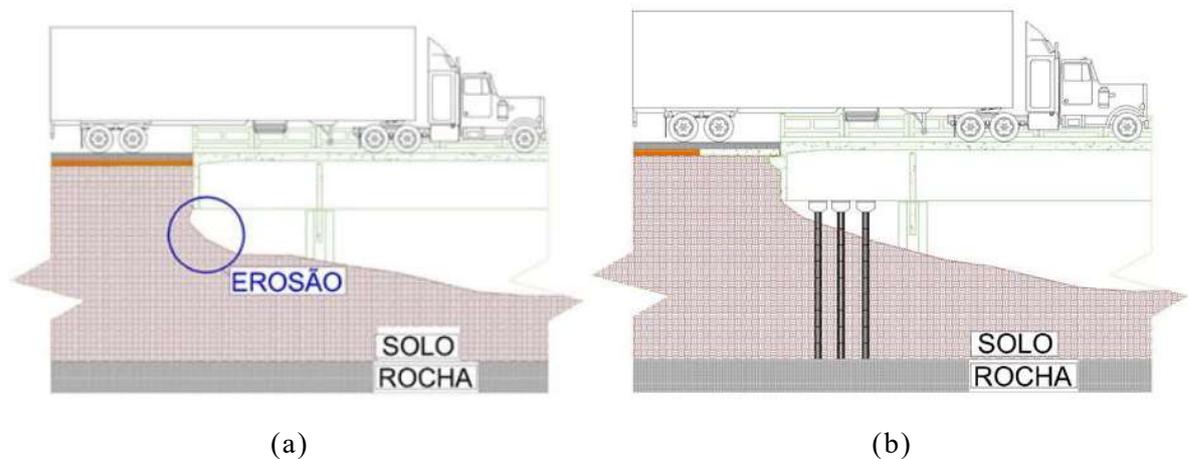


Fonte: Santos Júnior (2018)

Pereira, Lucena, Carmo (2021) apresentam o caso do estudo da ponte Córrego Pilões na BR-356 em Minas Gerais, cujas vibrações da superestrutura em balanço originam desconforto ao utilizador e manifestações patológicas na passagem, e tem estacas como solução de fundação. Um ponto bem claro durante o estudo foi que no esquema estrutural, as obras com extremidades em balanço eram mais vulneráveis. Portanto, o objetivo deste trabalho foi discutir as manifestações patológicas comuns causadas pela vibração excessiva da estrutura e ajudar a ampliar o conhecimento sobre o uso de estacas mega como reforço estrutural obras de artes especiais (OAE), visto que a bibliografia profissional sobre o assunto é deficiente. A obra estudada tem 56,70m, com 5 vãos, sendo com 1 vão central de 17,12 m, 2 vãos de 15,22 m, 2 OAEs extremas cantilever de 4,57 m. A apresentam 10,00 m de largura, pista única e sem acostamento. A ponte tem padrão de estruturas dimensionadas para o Trem tipo TB-36, e foi projetada e executadas entre 1960 e 1975. Não há literatura, informações e conselhos sobre a questão de pesquisa. Para tanto, serão descritas as manifestações patológicas que ocorreram e as ações corretivas tomadas pelo projetista. Desta forma, ressalta-se a importância da laje de transição para reduzir o recalque e proteger o talude para garantir a estabilidade do maciço. A ponte em questão tem vibração excessiva em uma extremidade.

Diante da necessidade de reforço da estrutura, os projetistas adotaram a instalação de estacas Mega como medida corretiva. Neste caso, as estacas de reação constituem um atenuador dinâmico (equilibrando o movimento da ponte) e são implantadas diretamente na superestrutura da OAE. O objetivo da inserção das estacas Mega é amortecer as vibrações que ocorrem no tabuleiro devido ao balanço associado a um aterro flexível. Verifica-se que a OAE em questão não possui laje de transição, o que justifica o rebaixamento do talude, evidenciado por fissuras transversais no pavimento da ponte. Como medida corretiva, as placas de transição devem ser feitas com espessura mínima de 25 cm e comprimento não inferior a 4 m. Através do estudo de caso, o uso da estaca mega foi bem sucedido. A Figura 10 apresenta a situação antes e depois do reforço. A rigidez estrutural adicionada após a instalação da estaca torna seu movimento imperceptível ao usuário. Além disso, a intervenção cessou devido à deterioração do aterro. Por outro lado, não foi construída a laje de aproximação, o que não resolveu o problema do abatimento do acesso.

Figura 10 – Desenho esquemático; (a) situação prévia da ponte; (b) situação após a execução das estacas mega.



Fonte: Pereira, Lucena e Carmo (2021)

Olavo, Gazda R. e Gazda M. (2017) apresenta uma obra de reforço das fundações da ponte Manoel Ribas no estado do Paraná que apresentava sapatas apoiadas em siltitos. A ponte foi dragada para obtenção de agregado para construção civil, fazendo com que as sapatas da ponte assentassem. O reforço da fundação com estacas de raiz na rocha exigiu e foi preciso executar uma perfuração no bloco de fundação existente, que somente foi usado para construir a ponte e depois havia sido abandonado. Após a execução das estacas, sobre elas foram construídos blocos de coroamento.

Os blocos são protendidos para garantir a adesão aos pilares existentes. Esses blocos são concretados com tubos de metal envolta do revestimento degradado da estaca, permitindo que a estaca se mova em relação ao bloco. As estacas são colocadas sob carga, os macacos reagem contra os blocos, depois o que o espaço entre a estaca e o tubo é preenchido com graute. Acima desses blocos, são incorporados suportes metálicos aos pilares, que permitem a ação de macacos hidráulicos, que reagem contra os blocos recém executados que sustentam os pilares. A Figura 11 apresenta a execução dos consolos para permitir a ação dos macacos hidráulicos. Depois que os macacos levantaram o peso da ponte, os pilares foram erguidos para nivelar a ponte e, em seguida, os pilares foram remontados. Essa obra de reforço possibilitou a reabertura ao tráfego facilitando a logística de abastecimento da cidade.

Figura 11 – Execução dos consolos para permitir a ação dos macacos



Fonte: ENSOLO (2006)

Nesse trabalho Sales e Costa (1996) apresentaram estudo de caso de dois históricos reforços de fundações. O primeiro caso é um edifício de seis pavimentos, com fundações em estacas de concreto pré-moldado cravadas a uma profundidade de 9 metros, começou a recalcar continuamente devido ao carregamento que excedeu a capacidade do solo, resultando em uma inclinação lateral de até 2° (55 cm de desaprumo). Para conter o problema, foi construída uma viga de fundação interligando os seis pilares da lateral crítica, em uma obra realizada em 48 horas usando concreto de alta resistência. Após a concretagem, os recalques atingiram 18 a 20 cm, interrompendo-se apenas 24 horas depois.

Com o risco de colapso temporariamente controlado, iniciou-se a recuperação do prumo do edifício através da construção de tubulões, cada pilar recebendo dois tubulões e uma viga de transição. Para ajustar o prumo, a viga foi concretada até uma cota inferior, com espaço para compensar os recalques. O processo de endireitamento, que durou cerca de 60 dias, utilizou cargueiras entre os pilares, carregamento com sacos de cimento e areia, e saturação sob as estacas para lubrificação, resultando na redução do desaprumo para menos de 5 cm.

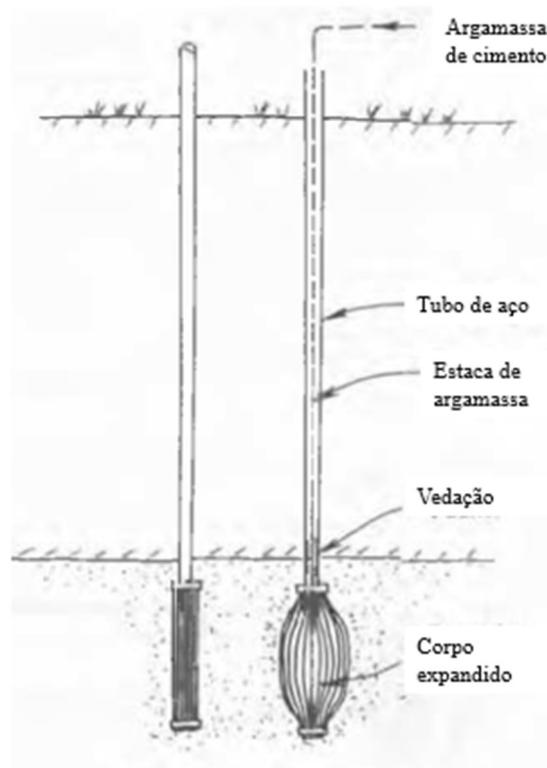
Dois anos após o caso anterior, um edifício de 17 pavimentos e alto padrão de acabamento apresentou sérios problemas estruturais devido a recalques diferenciados nos pilares, o que causou fissuras em vigas e lajes. A fundação, composta por tubulões a 6 metros de profundidade, ficou comprometida, exigindo reforços emergenciais. Durante a escavação para reforçar os blocos superficiais, novos recalques bruscos ocorreram, resultando na ruptura de vigas e lajes e causando a queda de fragmentos de concreto sobre os operários, o que levou à evacuação imediata da obra. Após a estabilização, o reforço foi retomado e, em 48 horas, 50% dos pilares foram reforçados.

Com os recalques interrompidos, foi realizada a recuperação estrutural, incluindo encamisamento de pilares e injeção de epóxi nas fissuras. Devido aos danos, o edifício ficou inclinado, atingindo um desaprumo de 70 cm no poço do elevador. O reforço definitivo envolveu a instalação de estacas injetadas e a recuperação gradual da inclinação, conseguindo-se corrigir mais de 85% do desalinhamento, permitindo que o edifício fosse habitado normalmente.

Nesse estudo Broms (1985) apresenta um novo tipo de estaca, a estaca com corpo expensor, é descrito no artigo e pode ser utilizado para reforço de fundações de estruturas. Uma fina chapa de aço dobrada é utilizada, sendo envolvida ao redor da parte inferior da estaca. A chapa de aço dobrada, ou corpo expensor, pode ser inflada no solo após a estaca ter sido cravada ou colocada em um furo pré-perfurado. Com isso, a capacidade de carga da estaca é aumentada. A capacidade de carga última da estaca pode ser estimada a partir da pressão máxima do cimento necessária para inflar o corpo expensor ou com base nos resultados de testes de penetração.

A nova estaca é cravada ou empurrada para dentro do solo, ou colocada em um furo pré-perfurado, conforme mostrado na Figura 12, dependendo das condições do solo e da capacidade de carga necessária para a estaca.

Figura 12- Estaca com corpo expensor (expander body)



Fonte: Broms (1985)

A argamassa de cimento é então injetada na chapa de aço dobrada, o corpo expensor, na parte inferior da estaca, através de um tubo de injeção de pequeno diâmetro dentro do eixo da estaca. O tubo é selado logo acima do corpo expensor. Um pé ou bulbo é formado quando o corpo expensor é inflado. A chapa de aço controla a argamassa para que ela não penetre no solo circundante. O volume da argamassa e a pressão necessária para a inflação são medidos. A partir da relação entre volume e pressão medida, a capacidade de carga última da estaca pode ser estimada.

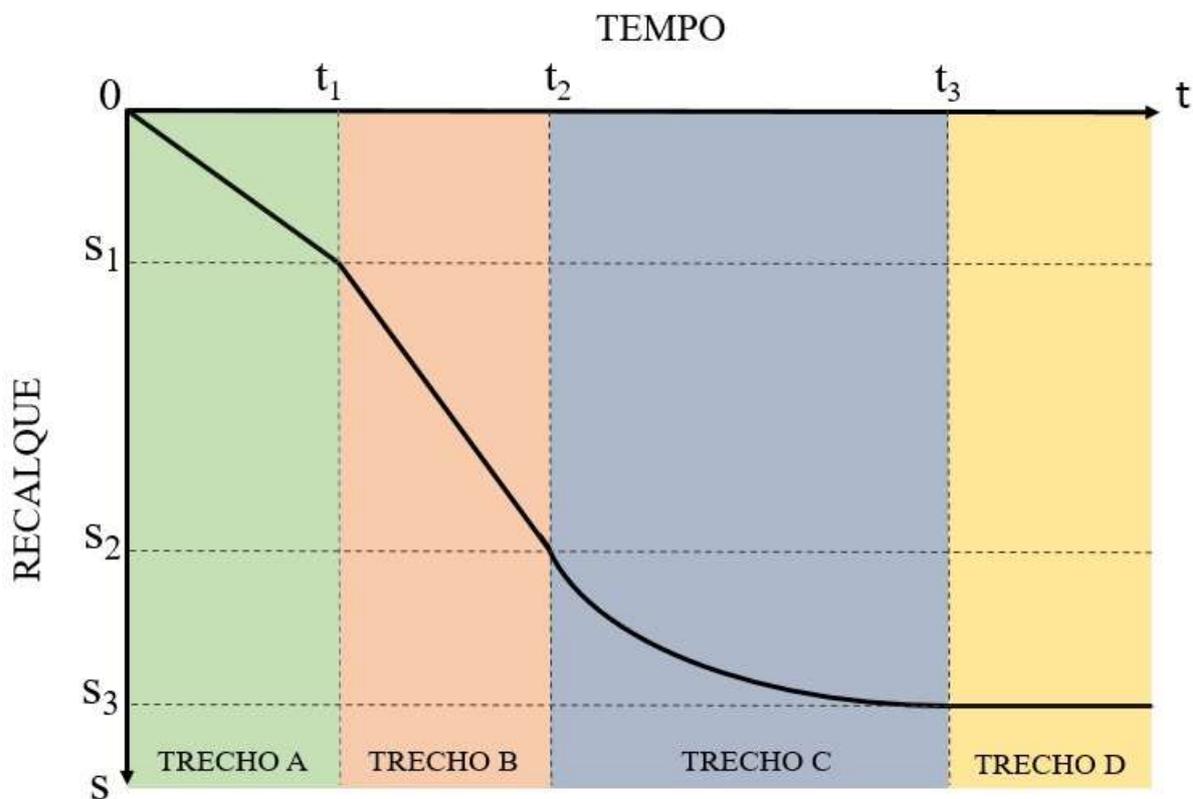
Os corpos expansores foram testados em silte e areia em dois locais na Suécia. Os testes indicam que os métodos de design propostos, em geral, fornecerão resultados que são seguros e, portanto, conservadores.

3 MODELO PROPOSTO POR GUSMÃO (2006)

O modelo em questão foi desenvolvido por Gusmão (2006)¹. O modelo foi pensado para explicar a evolução do recalque de edifícios submetidos a reforço de fundação em diferentes etapas, que vão desde o momento antes do reforço até a estabilização dos recalques.

O modelo é explicado pelo gráfico tempo x recalque. A curva é dividida em quatro trechos, como apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Curva do modelo conceitual



Fonte: Gusmão (2006)

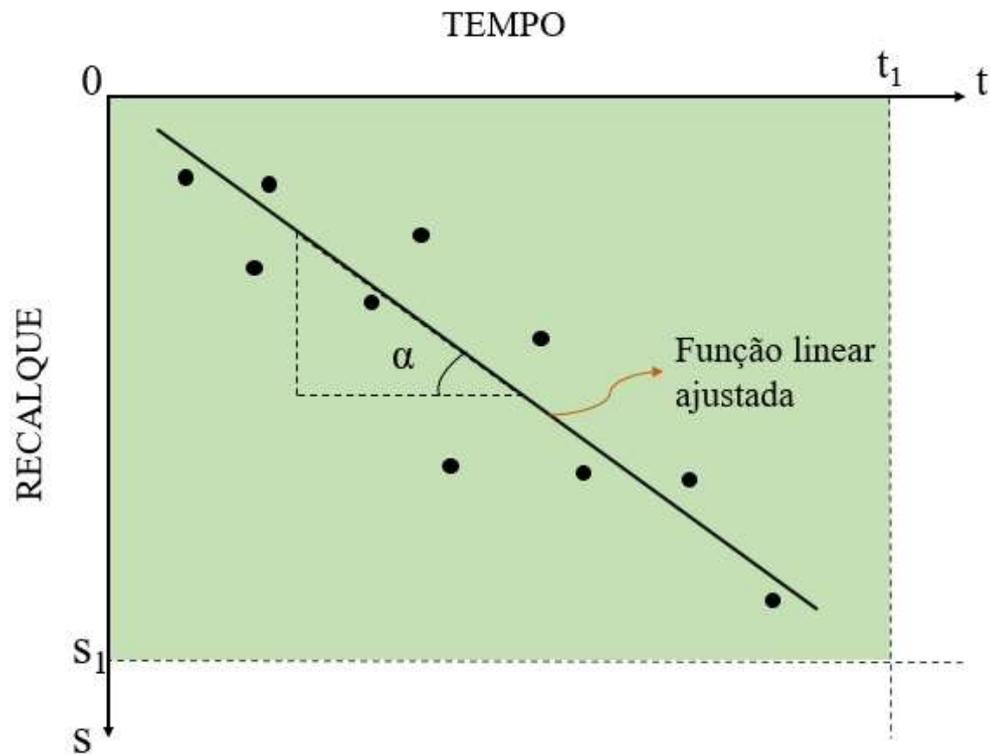
Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Deve-se separar todas as medições até antes do início da execução das estacas da sapata a ser reforçada. Em seguida deve ser feito um gráfico recalque x tempo para os pontos selecionados e ajustar os pontos com a função linear pelo método dos mínimos quadrados (ex: utilizando o Excel). A velocidade V_a é o coeficiente angular da função.

¹Informação fornecida por Gusmão durante palestra na Curso de especialização em geotecnia e fundação, São Paulo, 2006.

A Figura 14 mostra o gráfico com a função linear ajustada no trecho A e a equação 1 apresenta o valor da V_a

Figura 14 – Função linear ajustada no trecho A



Fonte: Gusmão (2006)

$$V_a = \tan \alpha \quad (1)$$

onde:

V_a = Velocidade do trecho A (mm/dia);

Para calcular o valor do recalque em qualquer tempo no trecho A, utiliza-se a equação 2.

$$S(t) = V_a \cdot t \Rightarrow t_1 \leq t \quad (2)$$

onde:

S = Recalque (mm);

t = Tempo (dia);

t_1 = Tempo no final do trecho A (dia)

Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Deve-se separar todas as medições entre o tempo do início da execução das estacas (t_1) e o início da incorporação das estacas e fundações existentes (t_2). Em seguida deve ser feito o gráfico recalque x tempo para os pontos selecionados e ajustar os pontos com a função linear pelo método dos mínimos quadrados. A velocidade V_b é o coeficiente angular da função, apresentada na equação 3. O fator de execução (μ) das estacas é a relação entre V_b e V_a , apresentado na equação 4.

$$V_b = \tan \beta \quad (3)$$

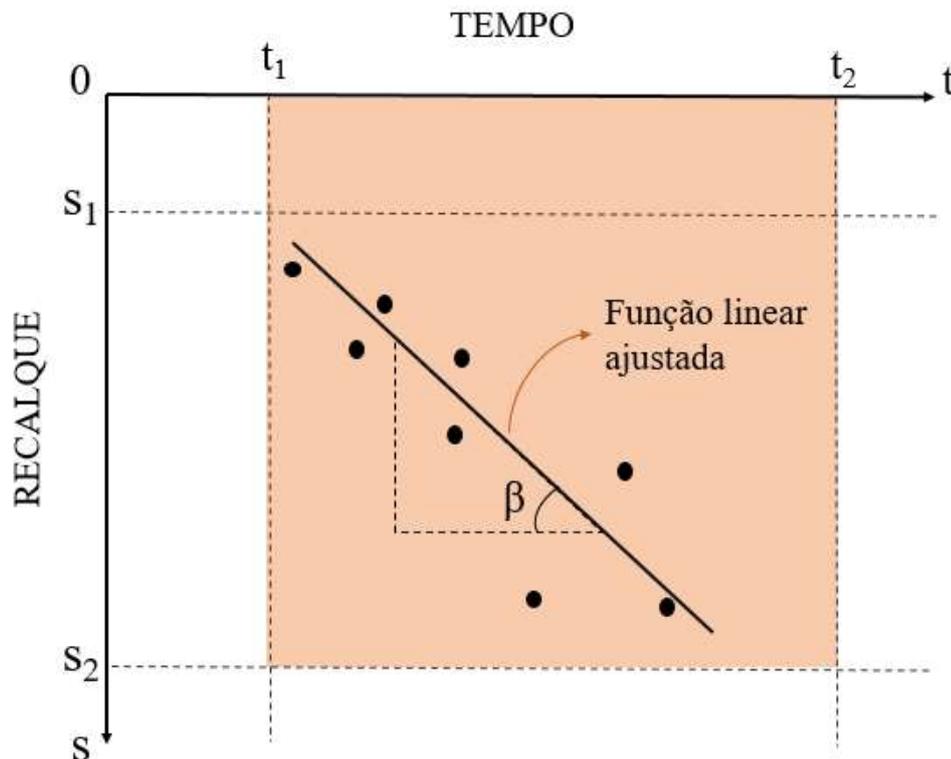
onde:

V_b = Velocidade do trecho B (mm/dia)

$$\mu = \frac{V_b}{V_a} \quad (4)$$

A Figura 15 representa o trecho B.

Figura 15 – Função linear ajustada no trecho B



Fonte: Gusmão (2006)

Para calcular o valor do recalque em qualquer tempo no trecho B, utiliza-se a equação 5.

$$S(t) = S_1 + V_b (t - t_1) \Rightarrow t_1 < t \leq t_2 \quad (5)$$

onde:

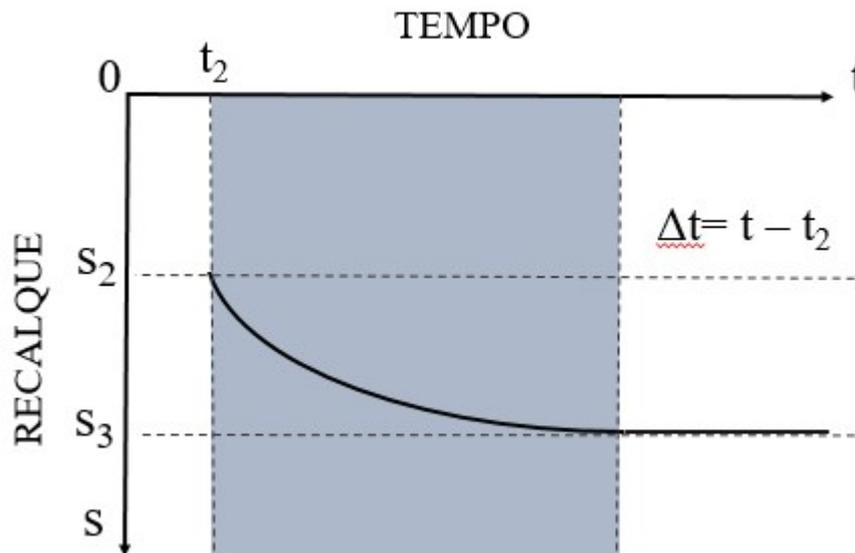
S_1 = Recalque no início do trecho B (mm);

t_2 = Tempo no final do trecho B (dia)

Trecho C: durante a incorporação das estacas de reforço à fundação existente

Deve-se separar todas as medições entre o tempo de incorporação das estacas de reforço da fundação existente (t_2) e o tempo de estabilização dos recalques ($V \approx 0$). Em seguida deve ser feito o ajuste dos pontos a uma função exponencial de recalque x tempo. A Figura 16 apresenta o ajuste.

Figura 16 – Função linear ajustada no trecho C



Fonte: Gusmão (2006)

As equações 6, 7, 8 e 9 apresentam o desenvolvimento da função para o ajuste linear.

$$S = S(\Delta t) = S_3 - (S_3 - S_2) \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta t) \quad (6)$$

onde:

S_2 = recalque após a data da última estaca executada (mm);

S_3 = recalque final após a estabilização (mm);

Δt = Variação de tempo (dia);

λ = coeficiente angular da função (t^{-1})

Da equação 6 tem-se:

$$(S_3 - S) = (S_3 - S_2) \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta t) \quad (7)$$

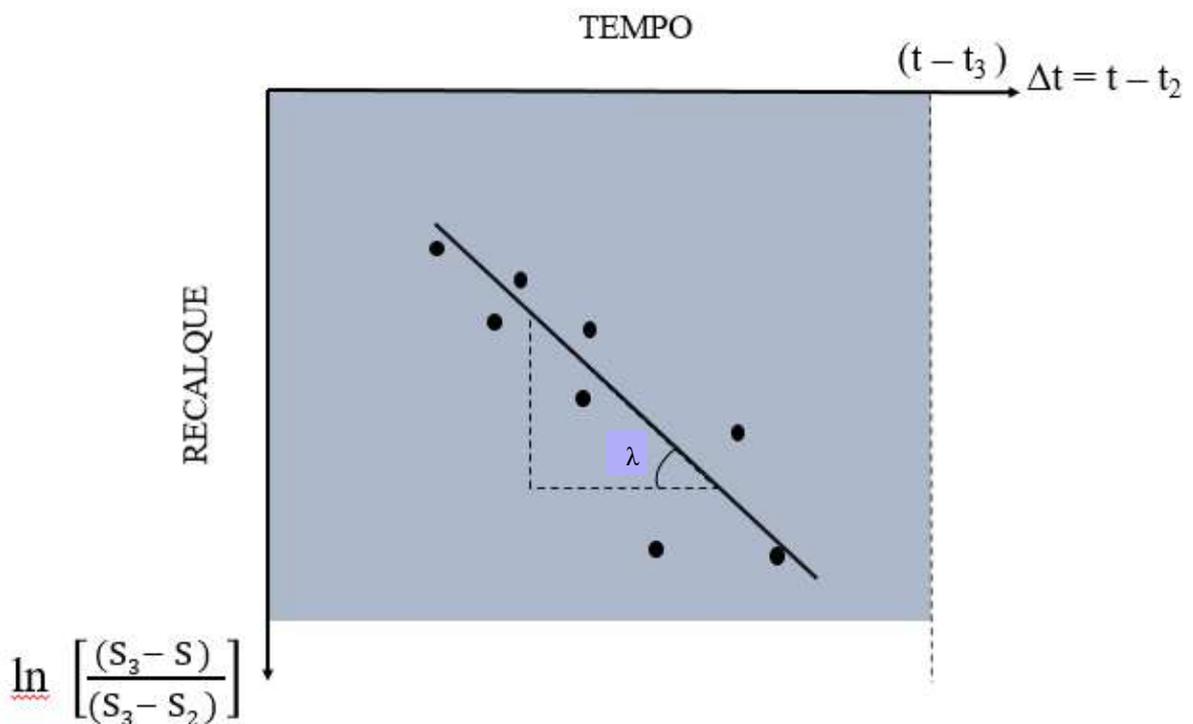
$$\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} = \exp(-\lambda \cdot \Delta t) \quad (8)$$

Aplicando o logaritmo neperiano em ambos os lados:

$$\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right] = -\lambda \cdot \Delta t \quad (9)$$

Ajustando a equação 9 ao gráfico $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right] \times \Delta t$ através de uma função linear pelo método dos mínimos quadrados, o coeficiente angular da função é o valor de λ . A Figura 17 apresenta o gráfico com ajuste linear.

Figura 17 – Ajuste linear da função exponencial



O valor de λ varia com o tipo de reforço. Quanto mais rígido e mais rápida a estabilização do recalque, maior é o valor de λ ; e quanto mais flexível e lenta a estabilização, menor o valor de λ .

Para calcular o valor do recalque em qualquer tempo no trecho C, utiliza-se a equação 10.

$$S(t) = S_3 - (S_3 - S_2) \cdot \exp [-\lambda (t - t_2)] \Rightarrow t_2 < t \leq t_3 \quad (10)$$

onde:

t_3 = Tempo no final do trecho C (dia)

Trecho D: após a estabilização

É quando há a estabilização do edifício e os recalques estabilizam. O valor da velocidade é aproximadamente zero.

Para calcular o valor do recalque em qualquer tempo no trecho D, utiliza-se a equação 11.

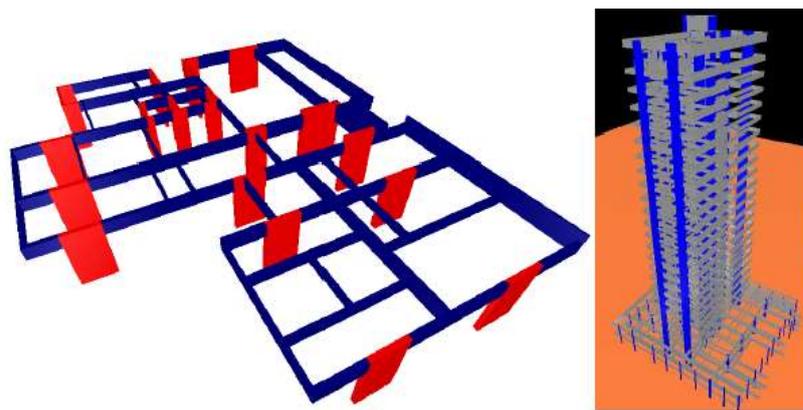
$$S(t) = S_3 \Rightarrow t > t_3 \quad (11)$$

4 CARACTERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS COM REFORÇO DE FUNDAÇÃO A SEREM ANALISADOS

4.1 Descrição do edifício A e reforço de fundação realizado

O edifício aporricado de concreto armado foi construído na década de 80 e sua ocupação aconteceu na década de 90. Possui 26 lajes e 62 pilares, sendo 18 na lâmina e 44 na periferia. O prédio possui um pavimento semienterrado com nível de -1,90m com referência ao nível do meio fio da avenida da orla. O projeto de fundação contém sapatas superficiais isoladas e associadas, e estão apoiadas em solo no nível -4,40m. Observando a perspectiva da edificação na Figura 18 é possível entender a estrutura (OLIVEIRA JÚNIOR,2010).

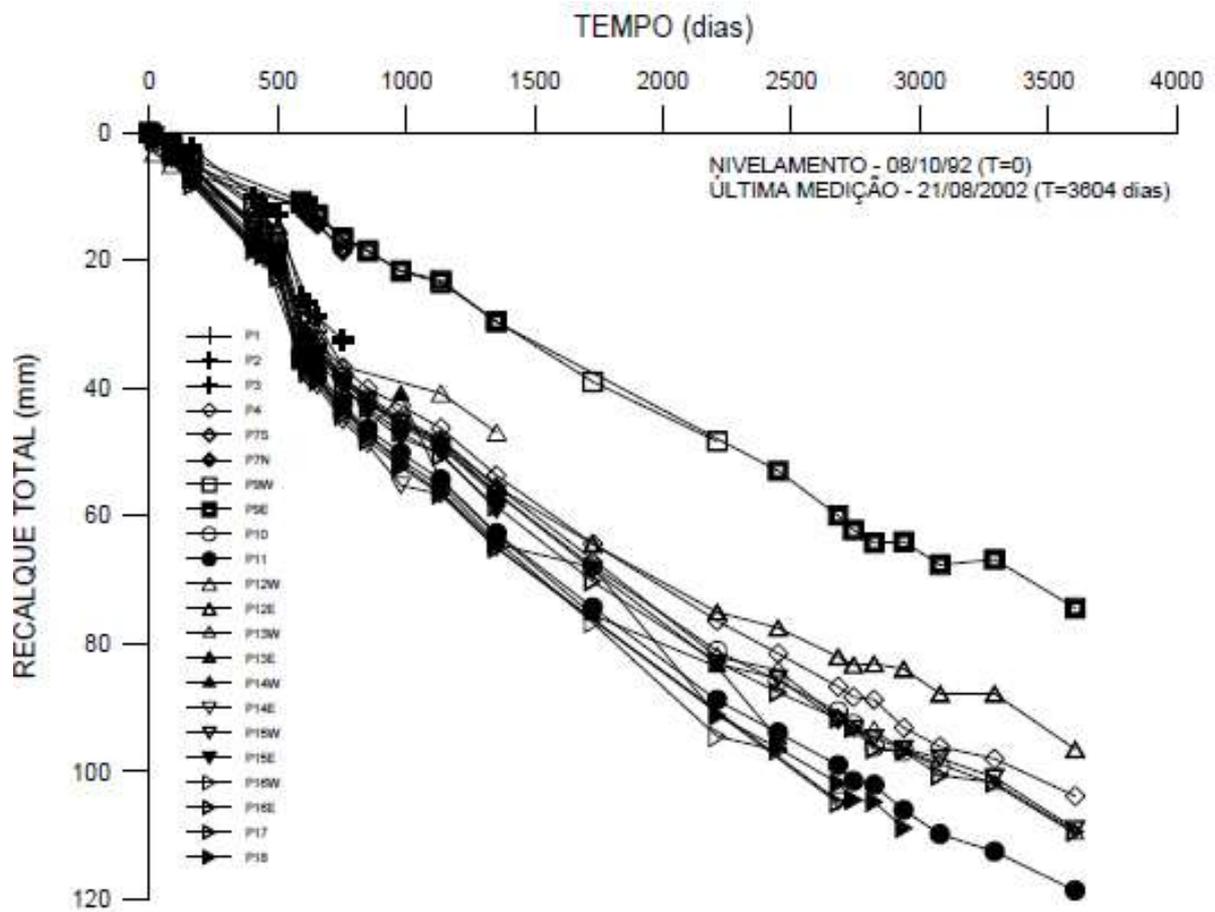
Figura 18 – Perspectiva do pavimento tipo e da estrutura



Fonte: Oliveira Júnior (2010)

Segundo informações colhidas com moradores, os danos presentes na estrutura apareceram desde o início da ocupação do imóvel e foram progredindo desde então, por causa disto foi iniciado um monitoramento entre 1992 e 2002, de acordo com Gusmão *et al.* (2008). A Figura 19 apresenta o gráfico do recalque monitorados ao longo do tempo na estrutura do prédio (OLIVEIRA JÚNIOR, 2010).

Figura 19 – Evolução dos recalques entre 1992 e 2002



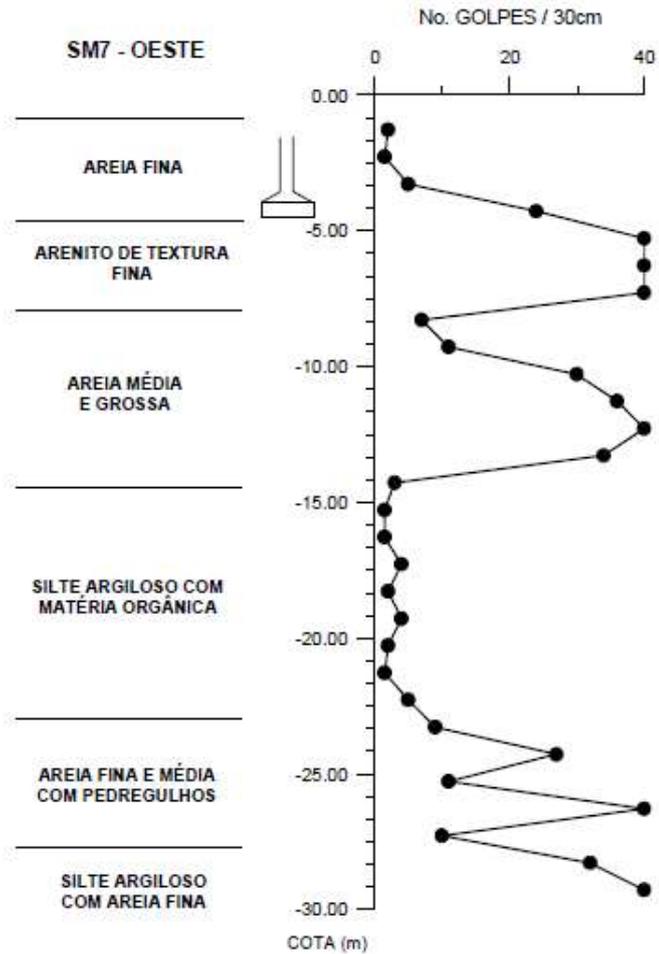
Fonte: Gusmão *et al.* (2008)

A estrutura apresentava trincas, além de um desaprumo acentuado nas direções leste e sul. Foi realizado o um levantamento completo dos danos do edifício e este mostrou danos maiores principalmente nos pavimentos inferiores (mezanino e garagem) e especialmente no trecho de ligação da torre do prédio com a sua periferia. A torre do edifício recalcou mais que a periferia, os pilares da ala leste e sul recalcarem mais que os demais, gerando desaprumo encontrado no prédio nos sentidos oeste e norte, pois a periferia e a torre estavam ligadas sem qualquer tipo de junta (OLIVEIRA JÚNIOR, 2010).

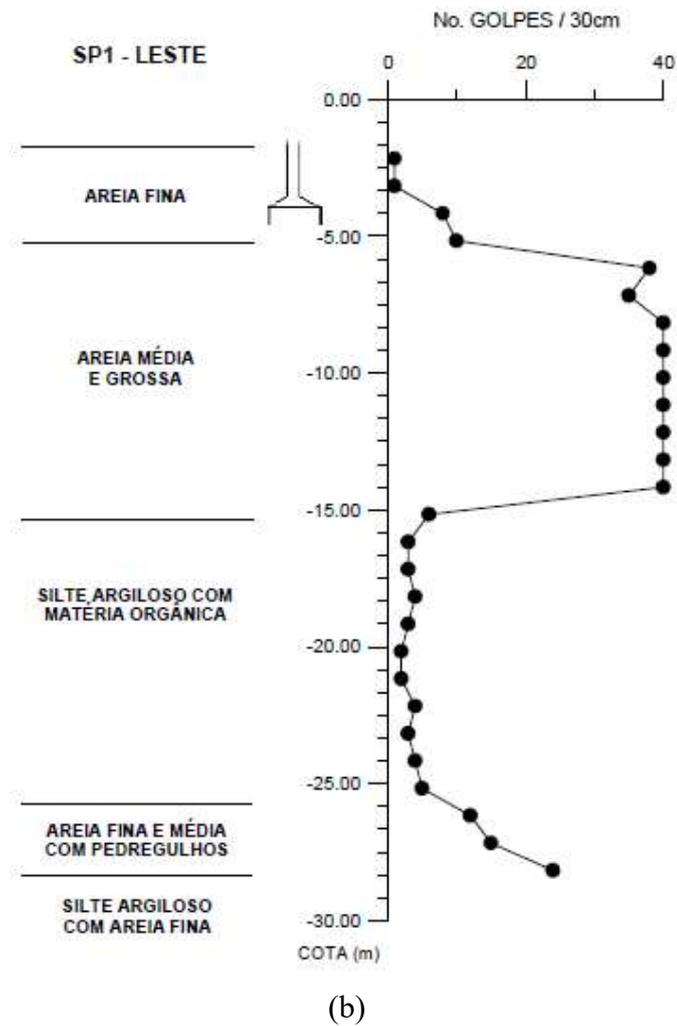
Assim percebeu-se a necessidade de realizar um reforço de fundação. Foram realizadas sondagens do tipo SPT e rotativa. O solo apresenta uma grande camada de argila siltosa com matéria orgânica, muito mole a mole entre as cotas -14,50 a -24,00. A água do lençol freático aparece entre as cotas -3,50 e -4,50, como é possível observar na Figura 20. A sondagem SP01

também descreve uma baixa resistência na cota de fundação -4,40, o que pode indicar a presença de um bolsão de areia fofa na parte sudeste do terreno (OLIVEIRA JÚNIOR,2010).

Figura 20 – Sondagens de reconhecimento – lado oeste e lado leste



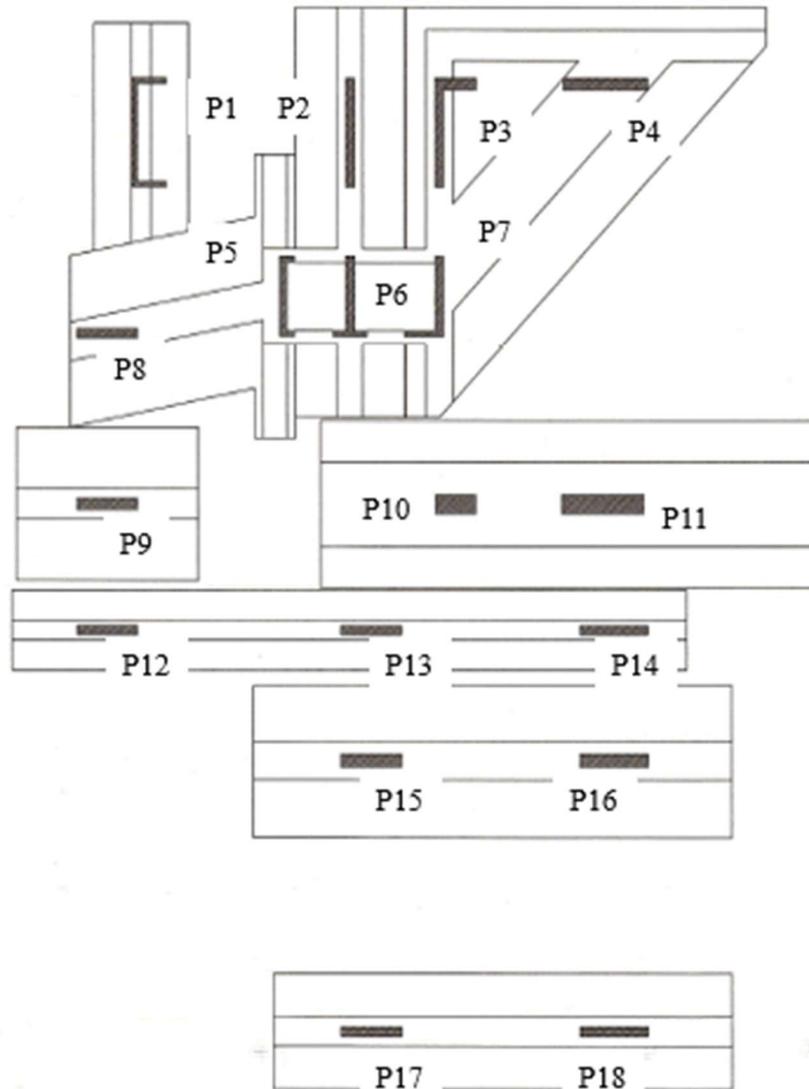
(a)



Fonte: Gusmão *et al.* (2008)

A forma de fundação apresentada na Figura 21, demonstra duas sapatas com geometria incomum, são elas as sapatas dos pilares P8 e P9. A taxa de trabalho das sapatas sem a ação do vento é de ordem de 450 kPa (OLIVEIRA JÚNIOR, 2010).

Figura 21 – Forma das sapatas

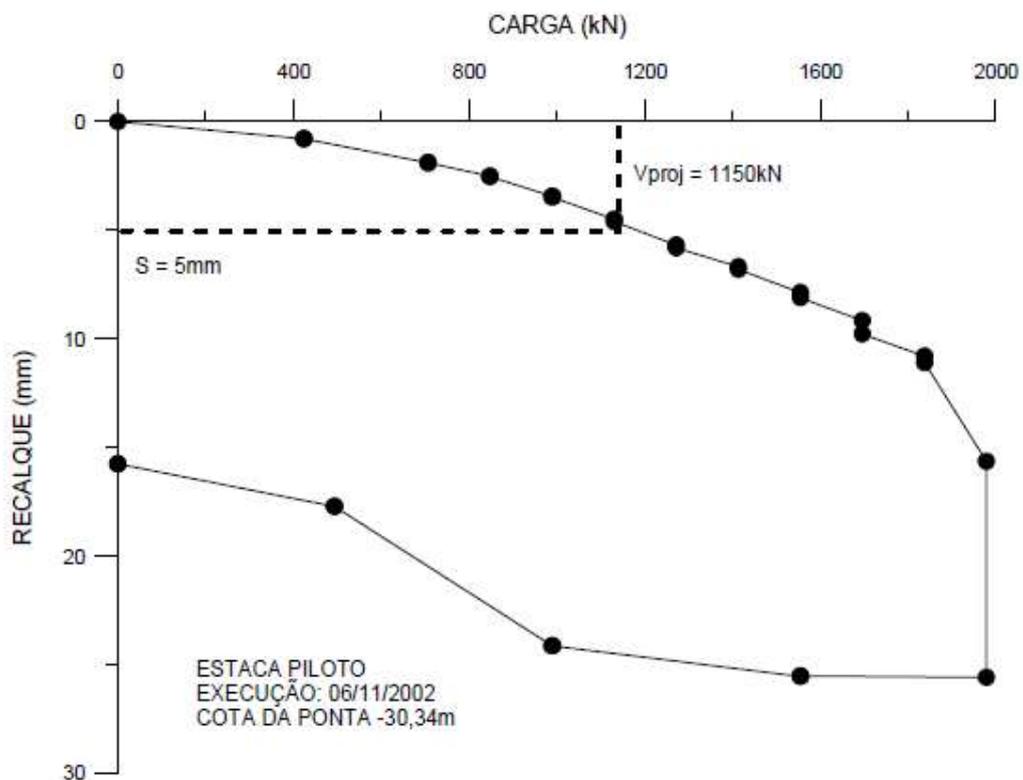


Fonte: Gusmão *et al.* (2008)

O primeiro projeto de reforço de fundação previa 172 estacas metálicas compostas por tubos de 168 mm de diâmetro e 30 metros de comprimento. Foi inicialmente realizada uma estaca piloto para execução de prova de carga, porém a execução apresentou vários problemas e essa possibilidade foi descartada e deu lugar a um segundo projeto de reforço com microestacas injetadas autoperfurantes. Enquanto a perfuração é feita, também é injetada a calda de cimento através do processo rotativo, controlando o avanço da composição, pressão e rotação, podendo reaproveitar a calda de cimento utilizada proveniente da perfuração de arenitos e das camadas arenosas. Depois de atingir a cota final da fundação à estaca precisa passar pelo tempo de cura, e após isso, executar a incorporação nos blocos de elevação e sapatas. Foram perfurados os

elementos de concreto e o arenito com brocas no diâmetro especificado em projeto e foi uma executada uma microestaca piloto de 28 metros aproximadamente, e nela foi realizada uma prova de carga que obteve resultados apresentados na Figura 22. A carga máxima de compressão foi de 1.979 kN. Como o problema da fundação era recalques excessivos foi estipulado um fator de segurança global de ruptura da estaca de 1,7 para uma carga admissível de 1.150 kN. É possível perceber que para uma carga de 1.150 kN o recalque necessário foi de 5 mm (OLIVEIRA JÚNIOR, 2010).

Figura 22 – Prova de carga vertical à compressão na estaca piloto



Fonte: Gusmão *et al.* (2008)

Segundo Oliveira Júnior (2010), a solução inicial previu reforço em todas as sapatas, porém após discussões técnicas ficou decidido um reforço em duas etapas:

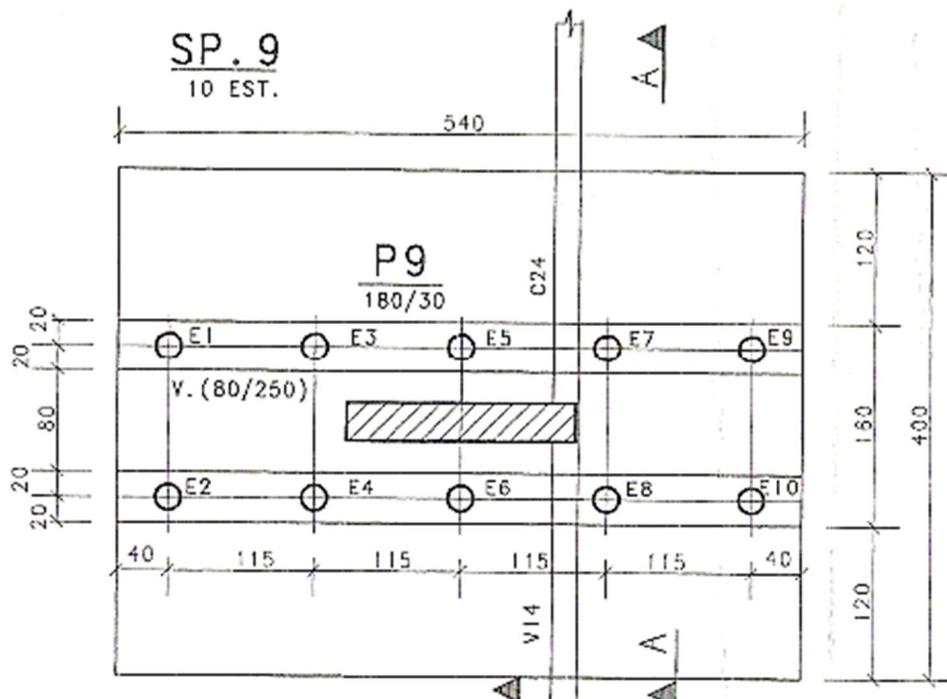
- 1ª etapa: realizar reforço das sapatas SP (17+18), SP (15+16), SP (12+13+14), SP (10+11) e SP9.
- 2ª etapa: realizar reforço das demais sapatas, somente se na 1ª etapa não estabilizasse o recalque do edifício.

Ainda de acordo com Oliveira Júnior (2010), a carga máxima nas estacas para distribuição descrita no projeto foi de 1.215 kN, cerca de 6% acima da carga considerada em projeto. O seguinte passo foi definir a ordem do reforço da fundação que seguiu uma análise de interação solo-estrutura, considerando-se os recalques medidos na obra, isso permitiu que não se formasse um núcleo de grande rigidez, que pudesse concentrar o carregamento do edifício em um número pequeno de pilares. O projeto foi executado seguindo as seguintes etapas:

- Execução do bloco de elevação em concreto simples para apoio do equipamento de execução da estaca;
- Execução dos furos nas sapatas para ancoragem dos tirantes;
- Execução dos furos laterais das vigas para ancoragem dos grampos;
- Execução das estacas e furos das sapatas e arenito;
- Execução dos tirantes, armaduras complementares do bloco de incorporação e grampos, após isso, concretagem em ordem definida pela análise de interação solo-estrutura.

As Figuras 23 e 24 apresentam o esquema do reforço de fundação citado.

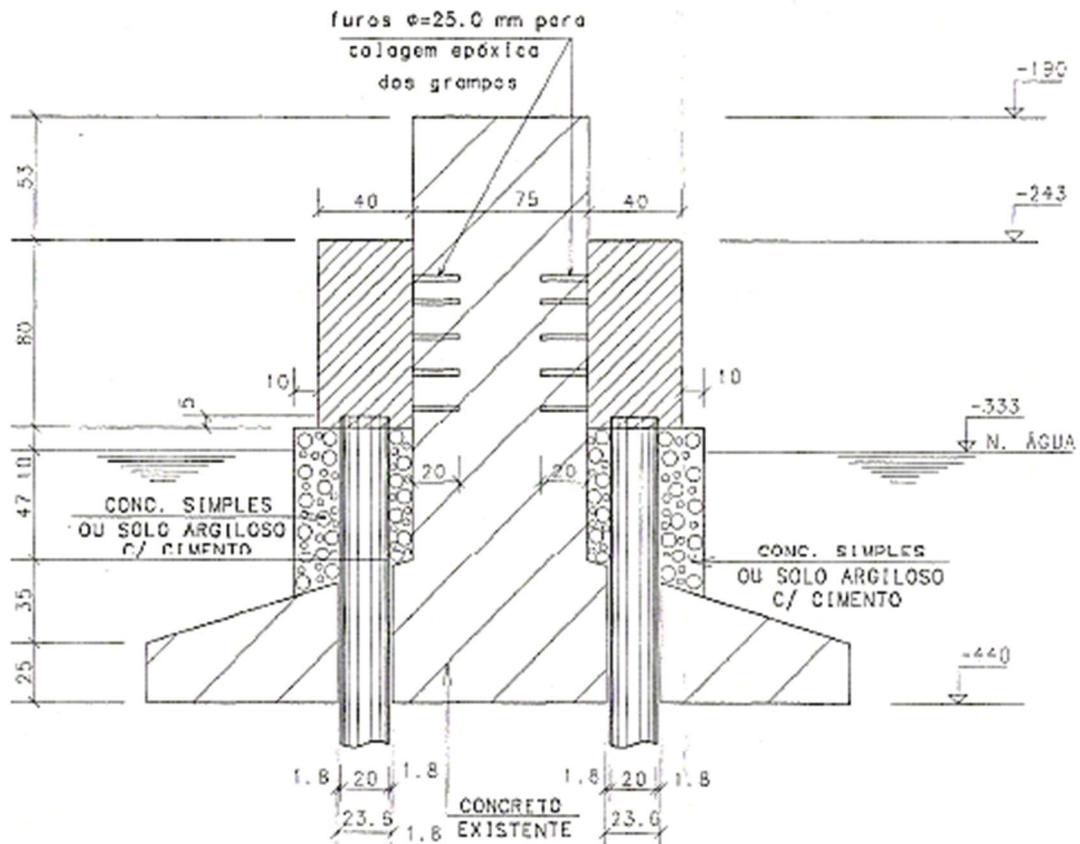
Figura 23 – Reforço da sapata SP9 (planta, cotas em centímetros)



4

Fonte: Gusmão *et al.* (2008)

Figura 24 – Reforço da sapata SP9 (corte)



Fonte: Gusmão *et al.* (2008)

Foram executadas 102 estacas no período de 21/07/2004 a 19/04/2005. Todo reforço foi feito com ocupação total do prédio, sendo interditado somente o pavimento semienterrado. O Quadro 1 apresenta as datas das leituras, número de estacas e a incorporação dos blocos às sapatas antigas (OLIVEIRA JÚNIOR, 2010).

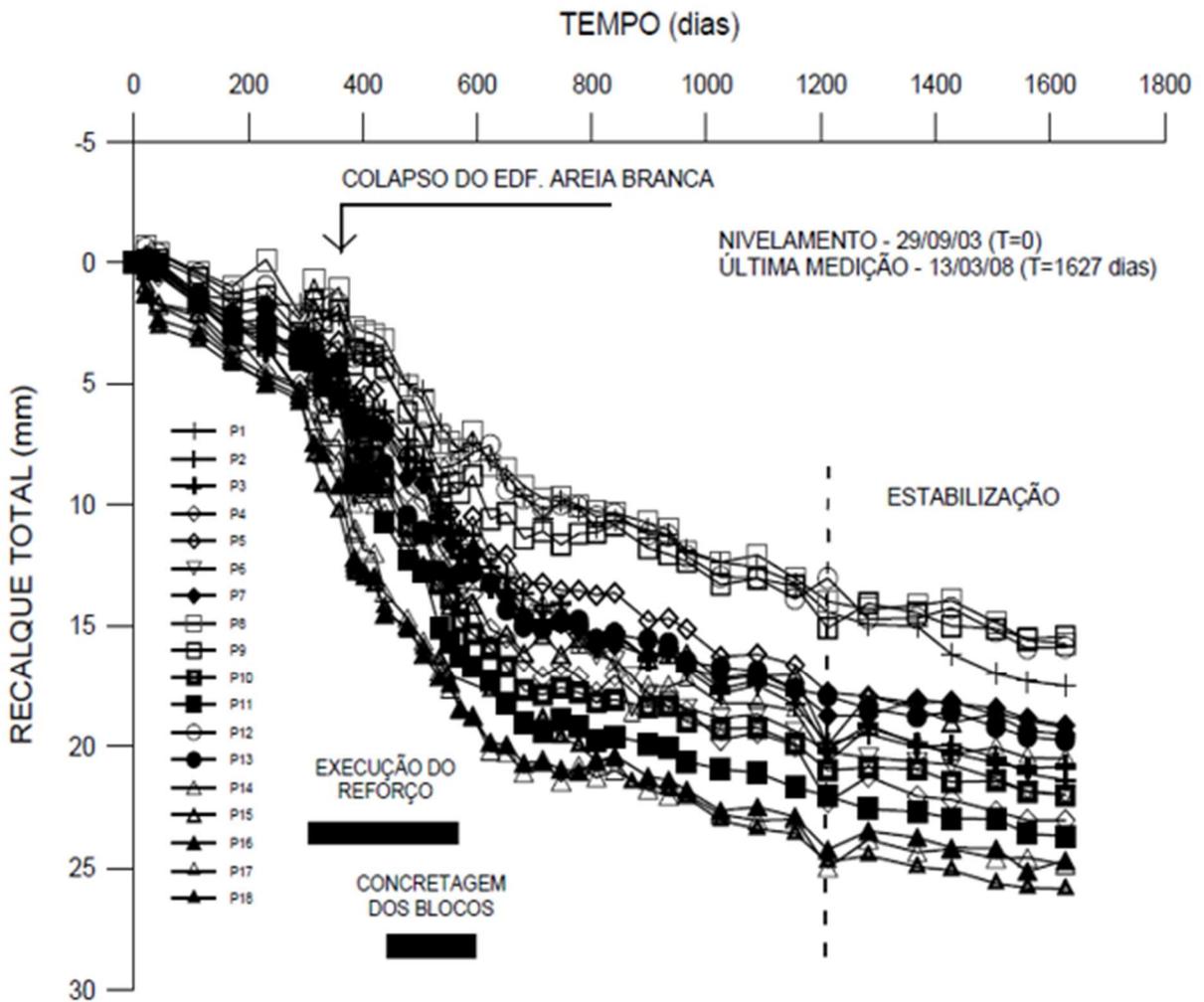
Quadro 1 – Informações das estacas e blocos de reforço da fundação

Sapata	Nº de estacas	Execução das estacas				Bloco	
		Início		Final		Início	
		Data	Leitura	Data	Leitura	Data	Leitura
P17+P18	18	20/07/2004	L8	01/09/2004	L10	22/12/2004	L16
P15+P16	26	02/09/2004	L10	01/01/2005	L16	14/01/2005	L17
P13+P14	12	01/01/2005	L16	16/02/2005	L17	17/02/2005	L18
P9	10	16/03/2005	L18	01/04/2005	L19	07/04/2005	L20
P12	6	06/02/2005	L17	15/03/2005	L18	07/04/2005	L20
P10+P11	30	02/04/2005	L19	10/05/2005	L21	23/05/2005	L22

Fonte: Adaptado de Gusmão *et al.* (2008)

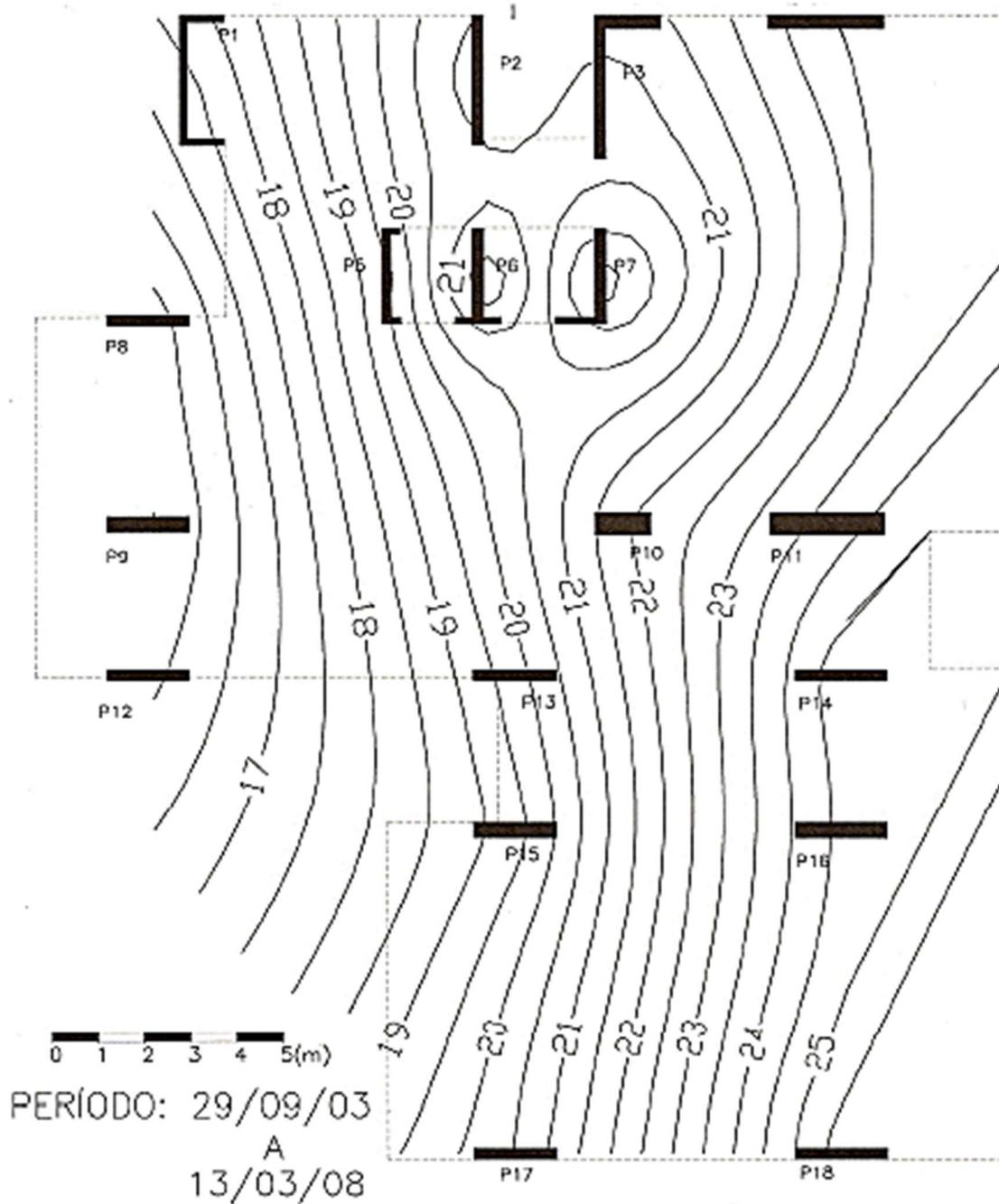
O monitoramento do recalque já estava sendo realizado antes do reforço, porém alguns pinos para medição estavam danificados e foram substituídos. Houve um intervalo de tempo em que não foram medidos os recalques, e isso aconteceu entre 21/08/2002 e 29/09/2003. A Figura 25 apresenta a evolução dos recalques dos pilares desde o começo do reforço das sapatas. Já a Figura 26 apresenta as curvas de iso-recalques do período entre 2003 e 2008 (OLIVEIRA JÚNIOR, 2010).

Figura 25 – Evolução dos recalques do edifício entre 2003 e 2008



Fonte: Gusmão *et al.* (2008)

Figura 26 – Curvas de iso-recalques da lâmina do prédio após o reforço (13/03/2008)



Fonte: Gusmão *et al.* (2008)

É possível notar que na fase de execução das estacas houve um aumento da velocidade dos recalques devido às alterações no terreno e isso é algo decorrente do processo de reforço de fundação, é comum acontecer em outras obras do mesmo tipo. A estabilização do recalque nesse edifício ocorreu depois de um período de aproximadamente 600 dias após a concretagem dos blocos e incorporação das estacas à fundação (OLIVEIRA JÚNIOR, 2010).

O edifício Areia Branca, que tinha 12 pavimentos, era localizado próximo ao edifício A, com aproximadamente 41 metros de distância, e no dia 15/10/2004 ocorreu seu desabamento. Nesse período as estacas do reforço de fundação ainda não haviam sido concluídas, porém não foi preciso realizar desocupação do edifício. Após o desabamento foi possível perceber um recalque de cerca de 2 mm, que aconteceu de maneira uniforme. Depois da estabilização do prédio, os danos existentes não seguiram evoluindo e o edifício passou por uma recuperação de trincas e fissuras em seus elementos estruturais e de vedação (OLIVEIRA JÚNIOR, 2010).

4.2 Descrição do edifício B e reforço de fundação realizado

Segundo Lopes *et al.* (2020), o Hospital Universitário Clementino Fraga Filho (HUCFF) apresentado na Figura 27, iniciou sua construção em 1950, com estrutura de concreto armado de 220 mil m².

Figura 27 – Obra do Hospital Universitário durante a construção

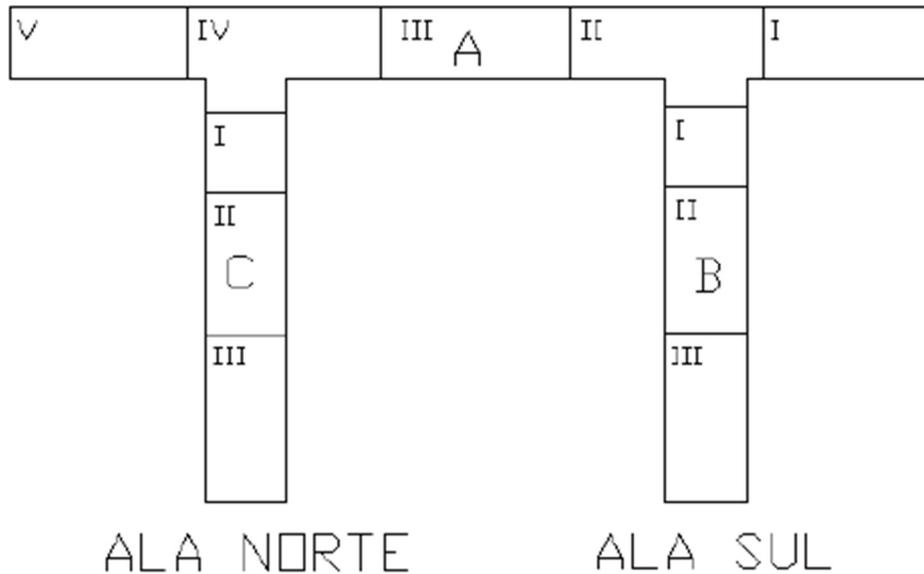


Fonte: Acervo do Núcleo de Pesquisa e Documentação – FAU/UFRJ – BRASIL)

Durante a construção a obra foi paralisada duas vezes, porém teve sua construção finalizada no ano de 1978. O prédio do Hospital contém vários blocos, divididos por juntas de dilatação. Os blocos são AI, AII, AIII, AIV, AV, BI, BII, BIII, CI, CII e CIII. Convencionou-se chamar

de Ala Norte os blocos AIII, AIV, AV, CI, CII E CIII e de Ala Sul os blocos AI, AII, BI, BII e BIII (SOUZA, 2013). A localização dos blocos e das alas do hospital são apresentados na Figura 28.

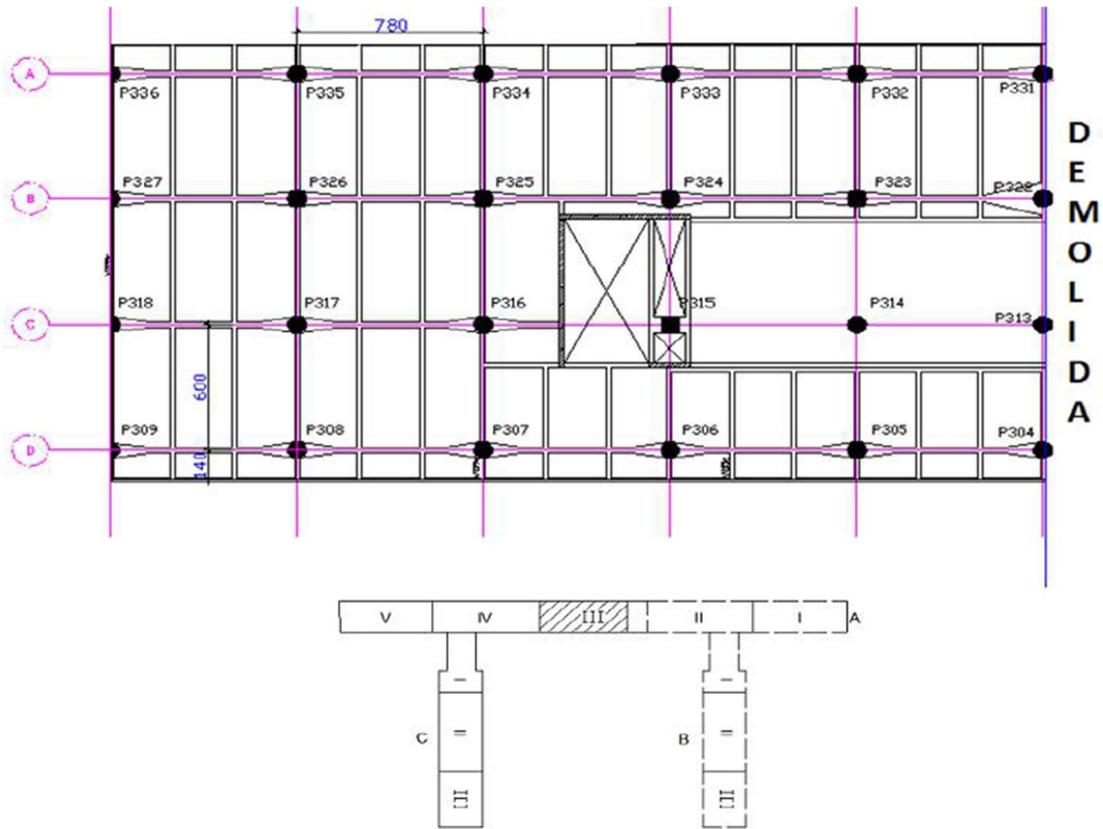
Figura 28 – Descrição dos blocos e das alas do hospital



Fonte: Souza (2013)

Contudo, após a inauguração do edifício, somente a Ala Norte foi ocupada, e por falta de manutenção, em 21 de junho de 2010, dois pilares da área AIII romperam-se. A Figura 29 apresenta a descrição do bloco AIII.

Figura 29 – Descrição do bloco AIII



Fonte: Souza (2013)

Lopes *et al.* (2020) afirma que após o caso, e uma avaliação estrutural na Ala Sul, o MEC (Ministério da Educação), em julho de 2010, decidiu demolir a Ala Sul do Hospital Universitário, após o diretor do HUCFF afirmar que recuperar o edifício custaria mais caro do que construir novamente.

A demolição seria parcialmente manual (com máquinas) para deixar um espaço de 20 m entre a parte a ser implodida e o restante do edifício. A implusão apresentada na Figura 30 aconteceu no dia 19 de dezembro de 2010. Depois da demolição, surgiram fissuras no bloco AIII, o que constata movimentação do bloco. Após esses acontecimentos, foi necessário realizar obras de reforço emergenciais em algumas fundações do bloco AIII do Hospital, para minimizar os recalques. Foram realizados dois tipos de reforço diferentes, com estacas Raiz e com estaca Mega (SOUZA, 2013).

Figura 30 – Implosão da ala sul do hospital

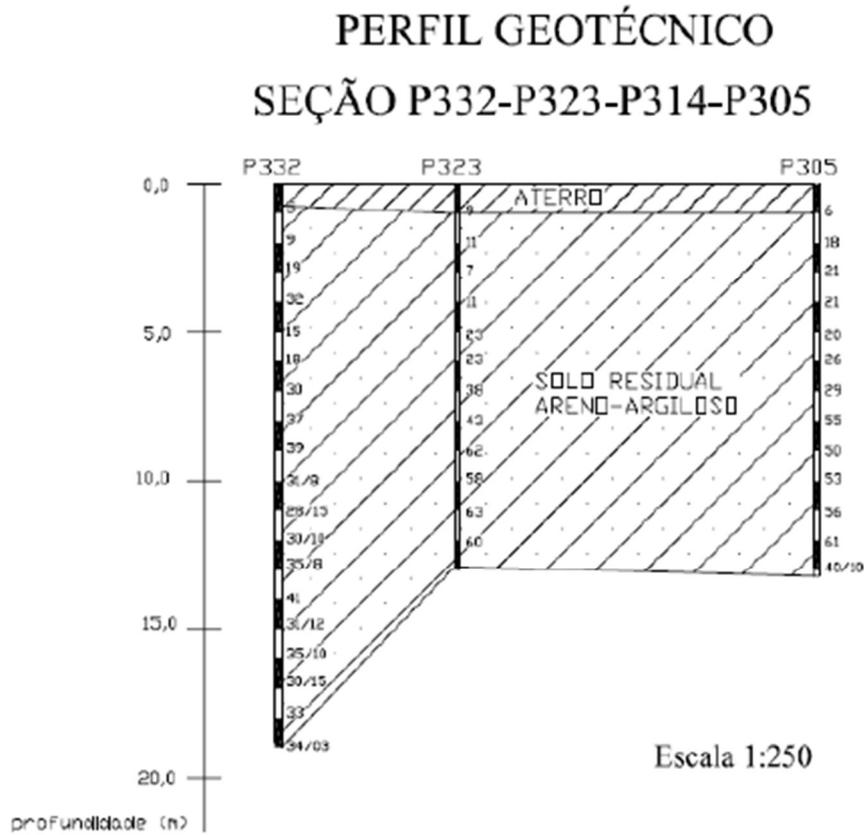


Fonte: Souza. (2013)

O hospital foi construído em uma área de vários aterros, provenientes de recalque e dragagem das areias originadas da Baía de Guanabara, e solo de alteração de gnaisses originados de uma colina que existia no local do hospital. O subsolo foi estudado por meio de sondagens, e apresentava-se essencialmente arenoso e areno-argiloso de compactidade que cresce com a profundidade, com eventuais casos de argila rija e dura. Já no subsolo do setor médico, onde se encontra o hospital, o solo apresentou-se imediatamente excelente.

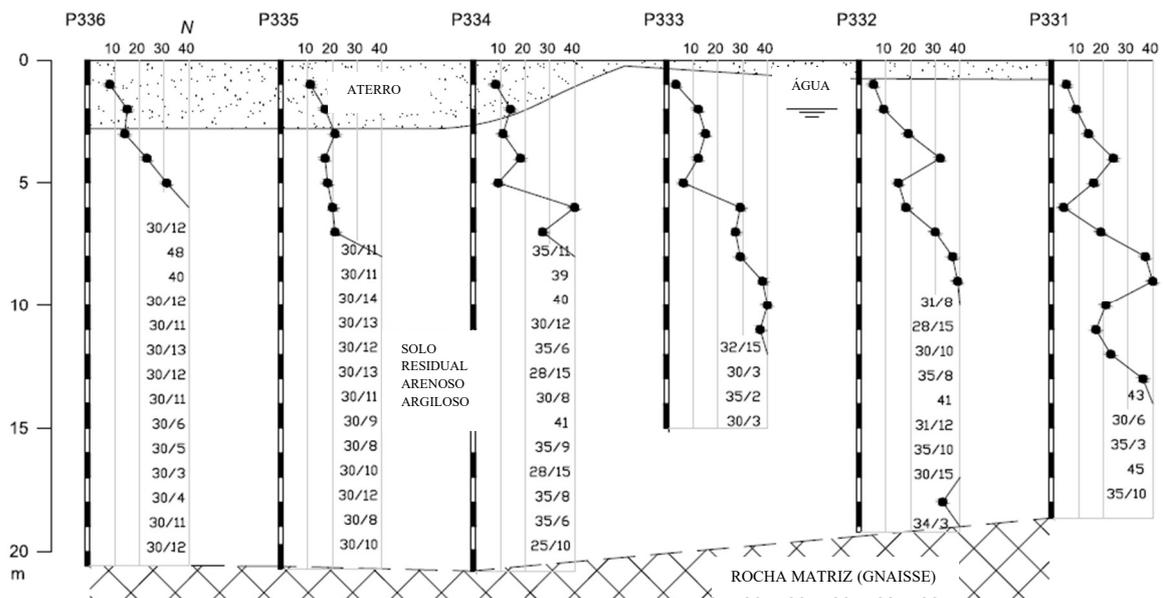
Depois do aparecimento das manifestações patológicas no hospital após a implosão, realizou-se sondagens a percussão na região do bloco AIII do Hospital Universitário pela empresa Geologus. As sondagens foram executadas junto aos pilares P305, P323, P331, P332, P333, P334, P335 e P336, a partir da laje do subsolo (SOUZA, 2013). A partir das sondagens realizadas, foram traçados dois perfis, mostrados nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Perfil Geotécnico das sondagens realizadas próximo aos pilates P332, P323 e P305



Fonte: Souza. (2013)

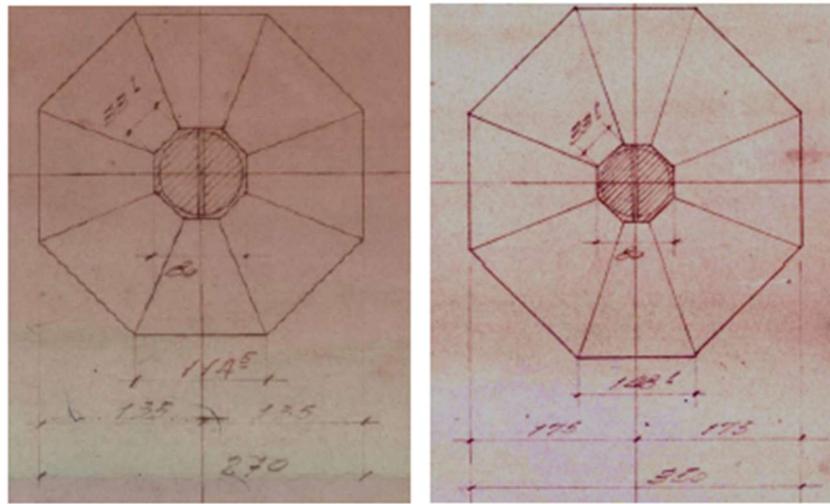
Figura 32 – Perfil Geotécnico das sondagens realizadas próximo aos pilares P336, P335, P334, P333, P332, P331



Fonte: Lopes *et al.* (2020)

A sondagem afirma a existência de “solo residual argiloso, siltoso, arenoso micáceo, cinza”. Além disso observou-se também uma pequena espessura de aterro seguido de uma camada de solo residual arenoso-argiloso até o impenetrável, a profundidade de 20,70m (SOUZA, 2013). As fundações existentes do bloco AIII do HUCFF são sapatas octogonais, como é possível observar a Figura 33.

Figura 33 – Planta das sapatas das linhas A e D



Fonte: Souza. (2013)

Quanto à cota da fundação, profundidade de assentamento das sapatas, elas se alteram de acordo com a posição no terreno. As sapatas dos três alinhamentos de pilares, próximo à parte demolida, estão na cota 1,20 m, enquanto os três alinhamentos de pilares mais próximas da junta de dilatação estão na cota 1,00 m. Essa cota é referente ao nível do subsolo onde foi executada a sondagem. As sapatas estão sobre um solo residual arenoso.

Após o aparecimento dos problemas na estrutura, iniciou-se um sistema de monitoramento de recalques com pinos metálicos no subsolo (um por pilar), na área do bloco AIII.

As leituras diárias são feitas a partir de 30 de setembro de 2011. Apenas quatro pilares foram inicialmente observados (P332, P314, P305 e P323). A partir de 6 de outubro de 2011, foram instalados mais oito pinos (P331, P322, P313, P304, P333, P324, P315 e P306). No início de novembro de 2011, foram instalados um total de 24 pinos restantes, permitindo o controle de todo o bloco AIII.

Os funcionários relataram a presença de trincas novas e ao aumento das trincas existentes. Por isso a necessidade do reforço foi constatada. De acordo com os usuários, as trincas que já

existiam no bloco AIII agravaram-se significativamente após a demolição e levou ao aparecimento de novas. Essas novas trincas, apresentadas nas Figuras 34 a 36, apontam a orientação de movimento do edifício, indicam o sentido de movimentação do prédio, auxiliando na observação dos movimentos verificados.

Figura 34 – Trincas existentes entre o pilar P335 e o bloco adjacente (primeiro andar)



Fonte: Souza. (2013)

Figura 35 – Outra trinca existente entre o pilar P335 e o bloco adjacente (primeiro andar)



Fonte: Souza. (2013)

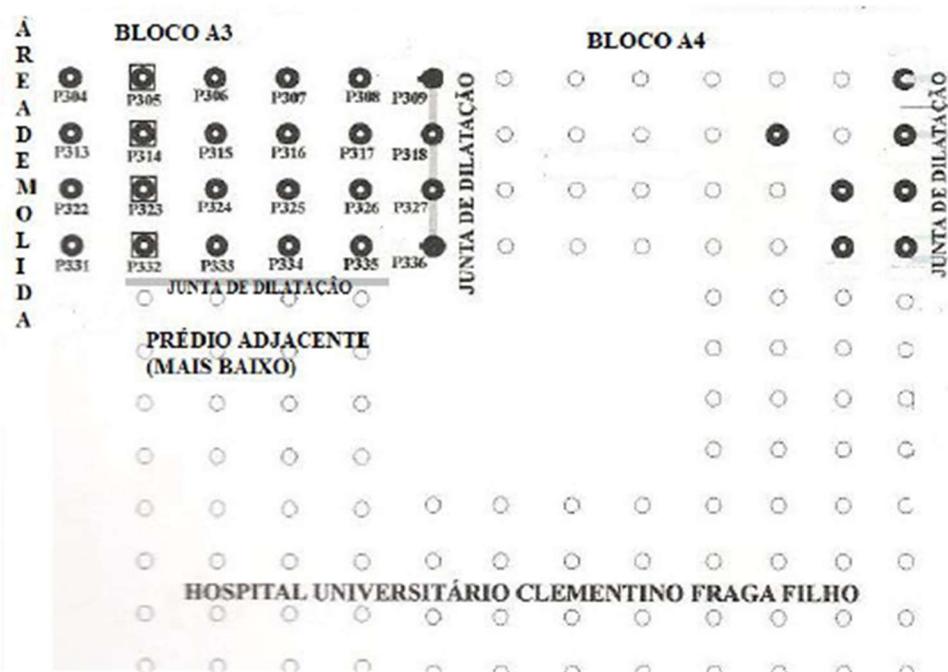
Figura 36 – Trincas existentes na parede entre o P323 e P324 (segundo andar)



Fonte: Souza (2013)

Uma representação esquemática da parte onde foram observadas novas trincas é apresentada na Figura 37. O bloco A3 está alocado entre o trecho demolido e as duas juntas de dilatação, uma que o isola do bloco A4 e outra que o isola do bloco mais baixo adjacente.

Figura 37 –Esquema do bloco AIII e blocos adjacentes



Fonte: Souza (2013)

As cargas atuantes nos pilares foram estimadas pelo escritório estrutural JC FILIZOLA ENGENHARIA. Estas cargas apresentadas no Quadro 2, foram obtidas a partir da modelação espacial no programa ROBOT, tendo em conta o seu próprio peso, peso de revestimento de $1,50 \text{ kN} / \text{m}^2$, uma carga de alvenaria distribuída de $1,00 \text{ kN} / \text{m}^2$ e uma carga variável de $3,00 \text{ kN} / \text{m}^2$, a qual foi diminuída a partir do 4º pavimento abaixo da cobertura conforme norma NBR 6120/80, com carga média por pavimento de $2 \text{ kN} / \text{m}^2$.

Quadro 2-Cargas nos pilares

(Continua)

Pilar	Carga (kN)	Pilar	Carga (kN)
304	3.271	322	3.273
305	5.724	323	7.085
306	5.612	324	6.779
307	5.642	324	6.595
308	5.596	326	6.269
309	3.805	327	3.967

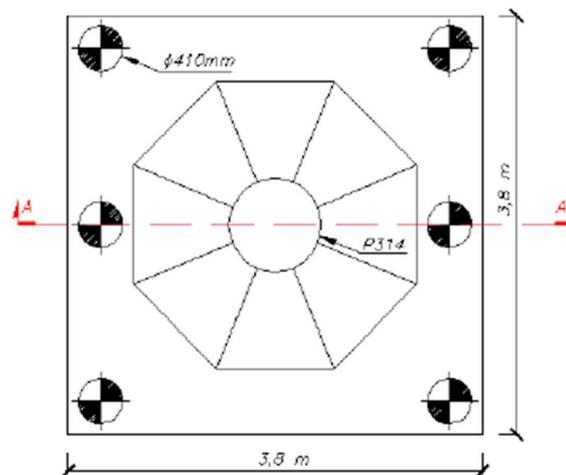
(Conclusão)

Pilar	Carga (kN)	Pilar	Carga (kN)
313	3.550	331	3.562
314	6.927	332	5.665
315	6.660	333	5.288
316	5.085	334	5.288
317	6.393	335	5.155
318	4.058	336	3.722

Fonte: Adaptado de Souza (2013)

A primeira solução de reforço consistiu na execução de seis estacas raiz para cada pilar, dispostas conforme Figura 38. Cada estaca tem diâmetro de 410 mm e comprimento de 16 m. Cada estaca tinha uma carga de trabalho de 1.000 kN. Seu processo consistiu em escavação, armação e concretagem.

Figura 38 – Planta de forma da sapata e bloco do P314 com estacas raiz de 410mm de diâmetro



Fonte: Dias (2014)

A Figura 39 apresenta o equipamento usado na execução das estacas raiz nos pilares P332, P314, P305 e P323.

Figura 39 – Equipamento de cravação das estacas raiz



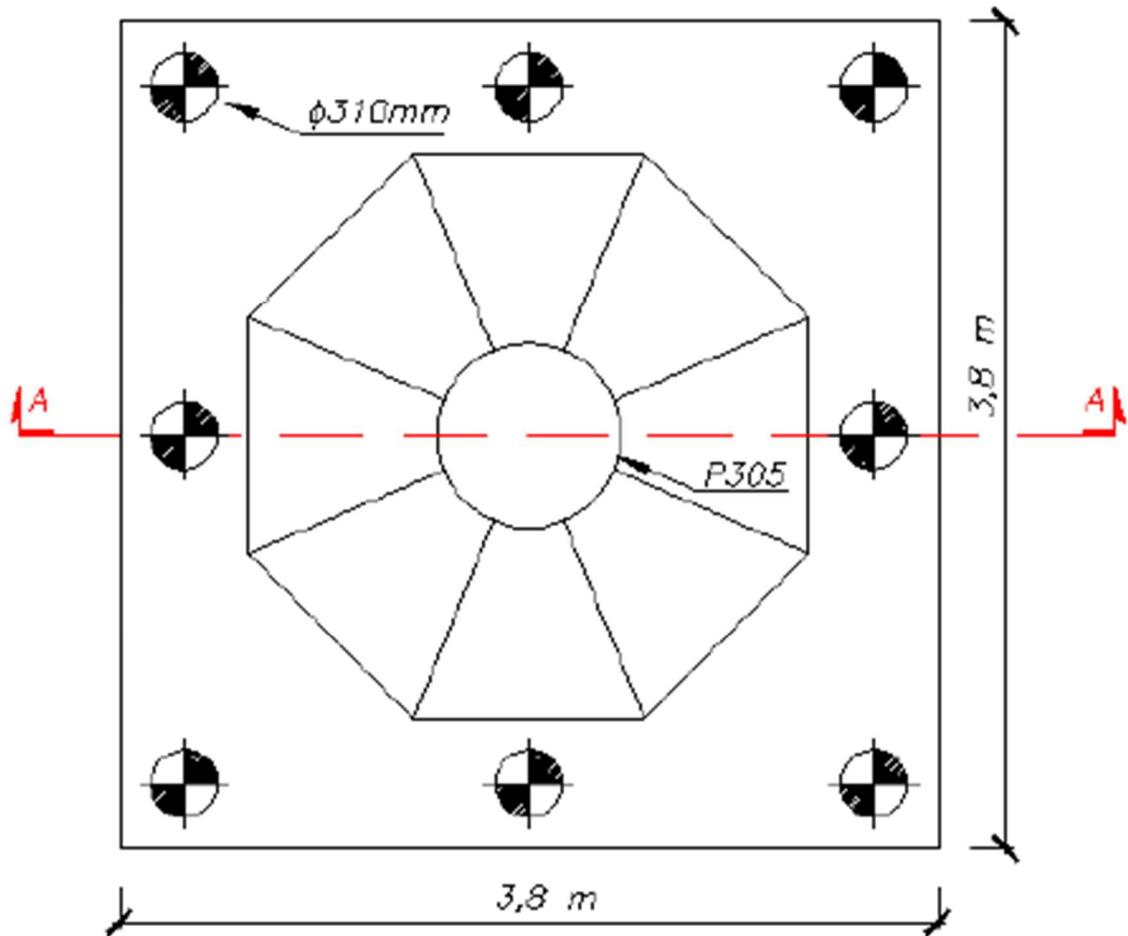
Fonte: Dias (2014)

Como no procedimento normal, devido restrições de altura, foram necessárias cinco conexões de armadura para atingir a profundidade necessária. Depois de colocar o aço, a argamassa é injetada (concretagem imersa em água). Por fim, foi executado um bloco, interligando as estacas com a sapata e o pilar.

Os pilares P332 e P314, foram reforçadas desta maneira e foi observado recalque significativo durante o reforço.

Depois disso, na tentativa de reduzir os recalques, assumindo que as estacas eram de grande diâmetro, modificou-se a solução e foram utilizadas oito estacas raiz de 310 mm, dispostas conforme a Figura 40.

Figura 40 – Planta de forma da sapata e bloco do P305 com estacas Mega de 310mm de diâmetro



Fonte: Dias (2014)

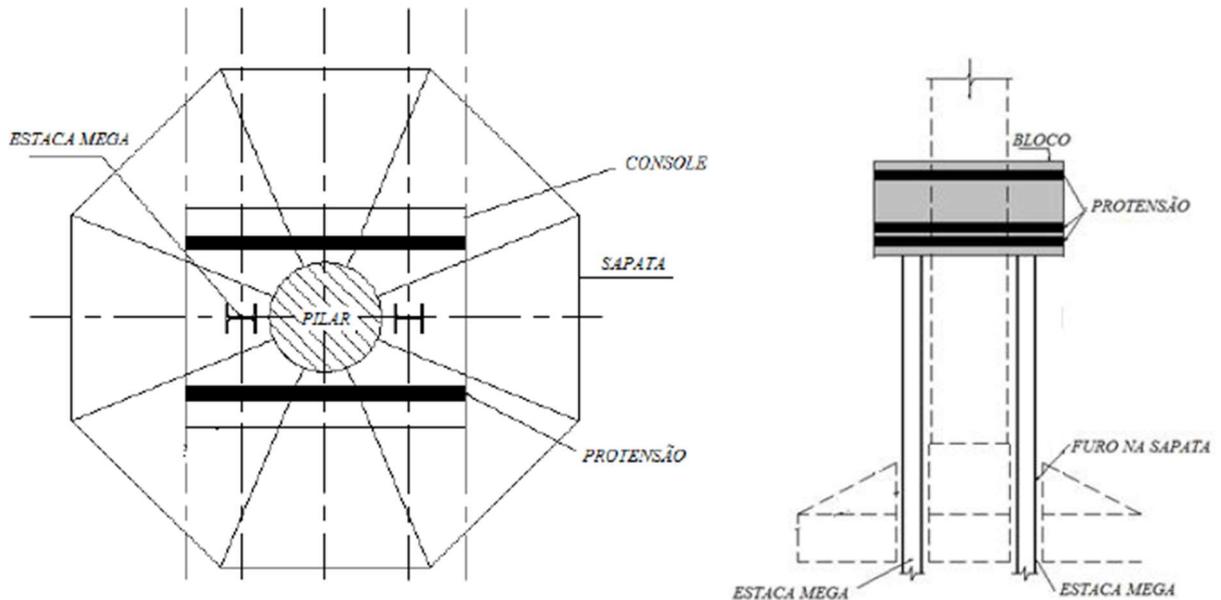
Cada estaca tinha uma carga de trabalho de 750 kN. O processo de execução foi alterado para usar ar comprimido em vez de água. As etapas restantes foram preservadas. De acordo com este projeto, os pilares P323 e P305 são armados. Os recalques continuaram em ritmo acelerado, contribuindo para a mudança no processo executivo do reforço.

Para minimizar o recalque, optou-se por utilizar uma solução com estacas Mega. A solução incluiu a utilização de duas estacas Mega por pilar, perfis WP-200-53, com carga de cravação de 900 kN por estaca. A NBR 6122 prevê a possibilidade de aplicação de fator de segurança de 1,5 para estacas do tipo Mega, pois o procedimento realizado é uma prova de carga.

Para o reforço com estacas do tipo Mega, primeiro foram perfurados dois furos com diâmetro de 30,4 cm na fundação existente, utilizando o equipamento de execução de estacas raiz com

coroas diamantadas. Além disso, foi construído um console, apresentado da Figura 41, ao qual o macaco poderia reagir. O console foi projetado para suportar cargas de trabalho de 1.000 kN.

Figura 41 – Console do reforço com estacas tipo Mega



Fonte: Souza (2013)

A execução consistiu em cravar os dois perfis simultaneamente através de furos na fundação existente, afim de evitar momentos adicionais no pilar. A estaca do primeiro bloco tem 3,00m de comprimento, as dos demais tem 1,50m de comprimento somando um total de 7 a 10m de comprimento. Conforme mostra a Figura 42, o acionamento é feito por meio de dois macacos, conectados pela mesma bomba, apoiados no perfil. Como a corrediça do macaco tem apenas 17 cm de comprimento, o curso teve que ser interrompido quando a corrediça do macaco atingia seu valor máximo, um suporte era colocado entre o macaco e o perfil metálico e o acionamento era continuado. Cada elemento foi soldado ao inferior com o auxílio de uma tala. Durante o processo de execução, o progresso do cilindro do macaco hidráulico foi monitorado e a carga aplicada e o deslocamento do pistão foram registrados.

Figura 42 – Execução das Estacas tipo Mega



Fonte: Dias (2014)

Além disso, foram feitas leituras de recalque no início e no final de cada ciclo de cravação. Quando o movimento do pistão não era mais observado, a carga de 900 kN era mantida por cerca de 15 minutos para confirmar a ausência de movimento. Então, a fase de encunhamento começava. Uma viga de metal foi colocada no perfil e cunhas e o macaco foram colocados na viga conforme apresentado na Figura 43.

Figura 43 – Estaca metálica depois de executado o encunhamento



Fonte: Dias (2014)

Este tipo de reforço foi realizado nos pilares P331, P322, P313, P304, P333, P324, P315 e P306. Desta forma, reduziu-se significativamente o recalque causado pela execução do reforço.

Após implosão que aconteceu em 19 de dezembro de 2010, o monitoramento começou em 30 de setembro de 2011 na linha reforçada com estacas raiz e em 6 de outubro de 2011 na linha reforçada com estacas Mega. No dia 14 de setembro, antes do início do monitoramento, iniciou-se o processo de reforço dos pilares. Conseqüentemente, houve um período em que não houve observação dos recalques, no entanto, observou-se durante o reforço de algumas fundações.

O cronograma de execução das estacas e incorporação aos blocos estão descritos no Quadro 3.

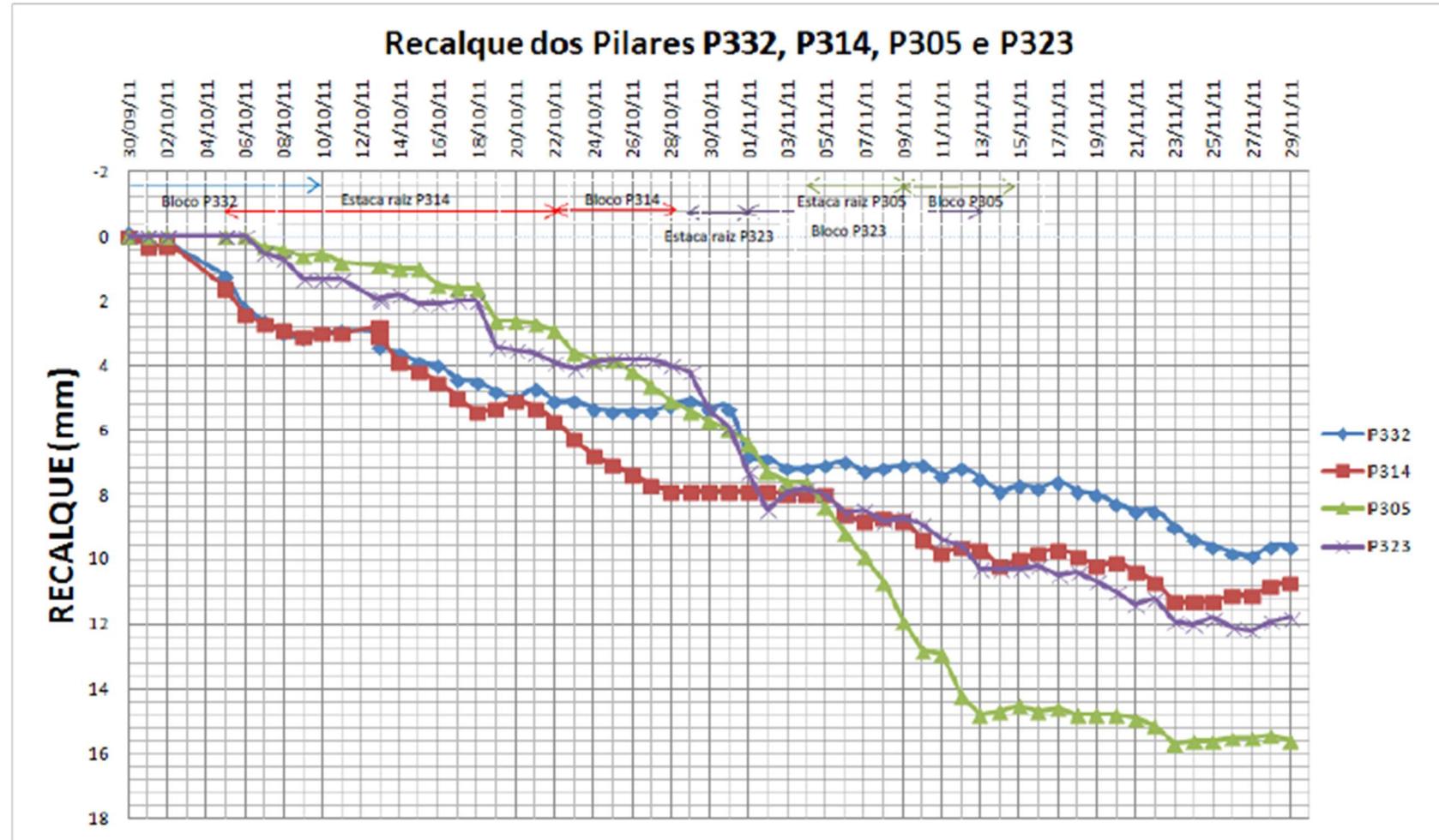
Quadro 3-Datas das etapas de reforço em cada pilar

Sapata	Nº de estacas	Execução das estacas		Bloco
		Início	Final	Início
		Data	Data	Data
P332	6 (RAIZ)	14/09/2011	29/09/2011	10/10/2011
P314	6 (RAIZ)	05/10/2011	22/10/2011	28/10/2011
P323	8 (RAIZ)	29/10/2011	01/11/2011	13/11/2011
P305	8 (RAIZ)	04/11/2011	09/11/2011	15/11/2011
P333	2 (MEGA)	26/01/2012	28/01/2012	29/01/2012
P315	2 (MEGA)	06/02/2012	08/02/2012	09/02/2012
P324	2 (MEGA)	14/02/2012	14/02/2012	15/02/2012
P306	2 (MEGA)	15/02/2012	17/02/2012	18/02/2012
P322	2 (MEGA)	28/03/2012	30/03/2012	31/03/2012
P304	2 (MEGA)	03/04/2012	04/04/2012	-
P331	2 (MEGA)	15/03/2012	17/03/2012	18/03/2012
P313	2 (MEGA)	20/03/2012	21/03/2012	22/03/2012

Fonte: Adaptado de Souza (2013)

A Figura 44 apresenta os recalques dos pilares que foram reforçados com estaca raiz, e em seguida a Quadro 4 apresenta um resumo dos recalques medidos em cada etapa.

Figura 44 –Recalque ao longo do tempo dos pilares P332, P314, P305 e P323



Fonte: Souza (2013)

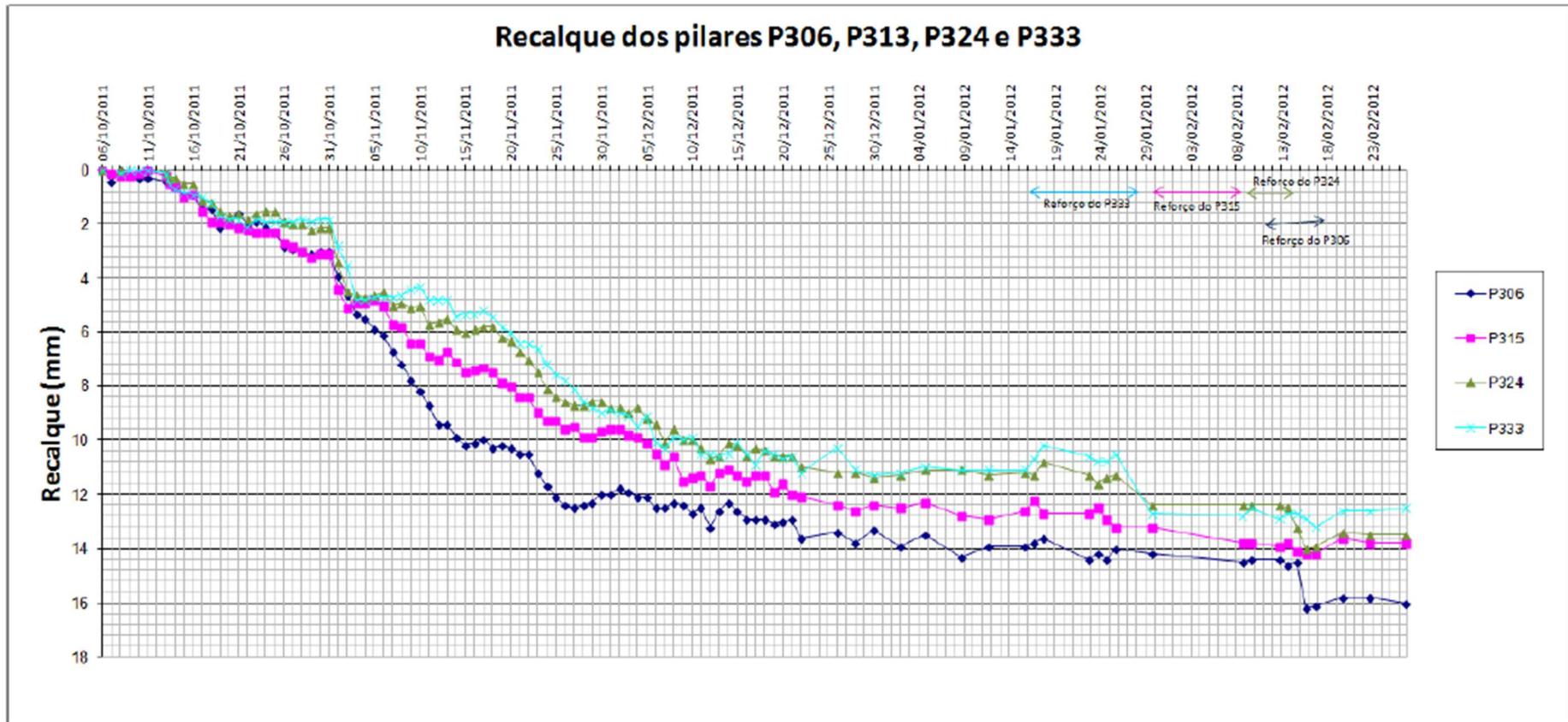
Quadro 4- Resumo dos recalques medidos dos pilares P332, P314, P323, P305

Pilar	Recalques (mm)			
	Antes do reforço	Execução das estacas	Bloco de coroamento	Após o reforço (até abril)
P332	-	-	3	9
P314	0	5	2,5	6,5
P323	4	3	3	4
P305	7,6	4,3	2,6	3

Fonte: Adaptado de Souza (2013)

A Figuras 45 e 46 apresentam os recalques dos pilares que foram reforçados com estaca Mega, e em seguida, o Quadro 5 apresenta um resumo dos recalques medidos em cada etapa.

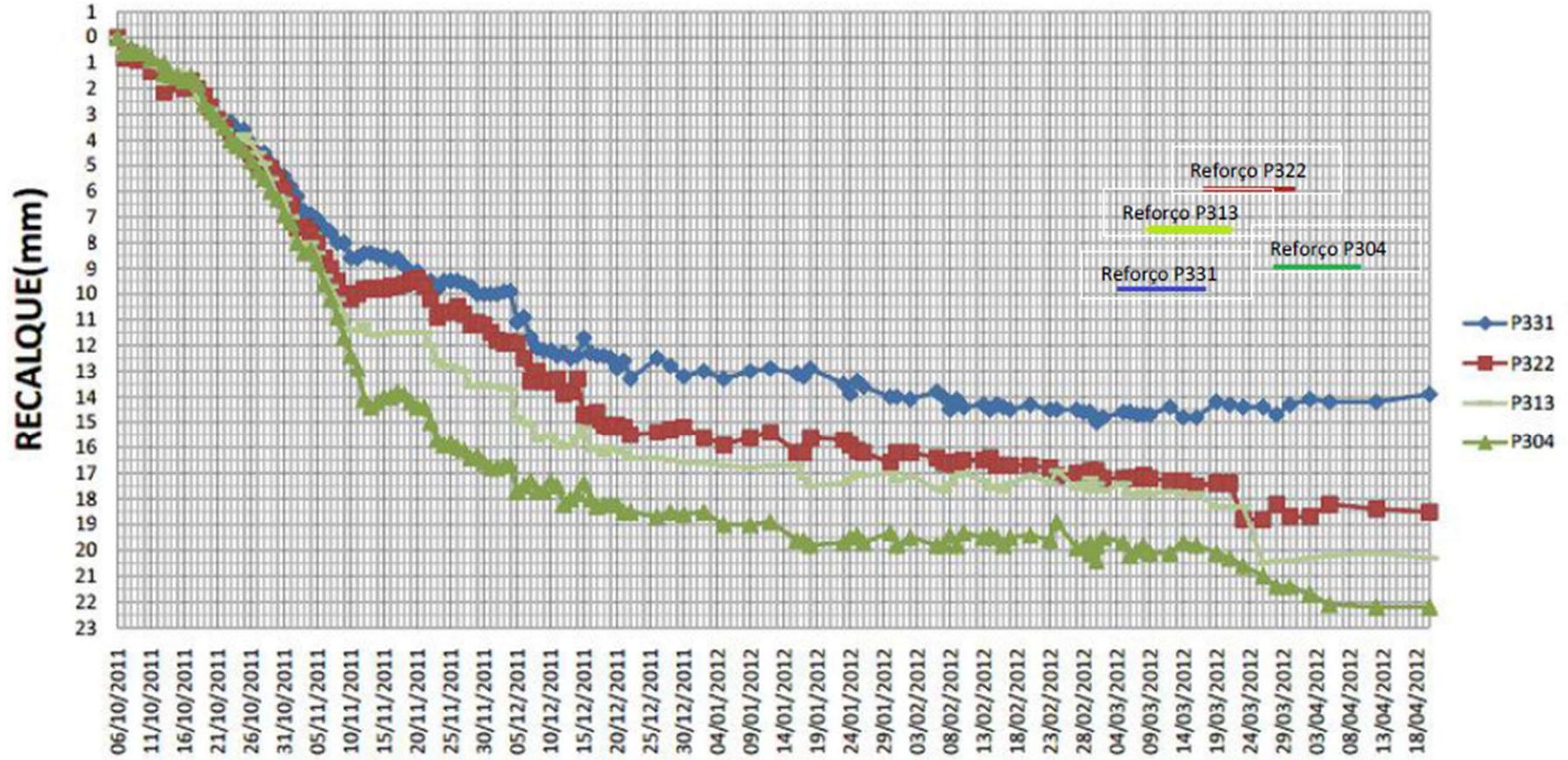
Figura 45 – Recalque ao longo do tempo dos pilares P306, P313, P324 e P333



Fonte: Souza (2013)

Figura 46 – Recalque ao longo do tempo dos pilares P331, P322, P313 e P304

GRÁFICO DOS PINOS



Fonte: Souza (2013)

Quadro 5 - Resumo dos recalques medidos dos pilares P306, P313, P324, P333, P331, P322, P313 e P304

Pilar	Recalques (mm)			
	Antes do reforço	Execução do console	Durante o reforço (medido após a execução do mesmo)	Depois do reforço
P333	11	0	2	0
P315	13	0	0,8	0
P324	12	0	1,5	0
P305	14,5	0	1,6	0
P331	15	-	0	-
P313	18	-	2	-
P322	17	-	1,5	-
P304	21,5	-	1,0	-

Fonte: Adaptado de Souza (2013)

5 METODOLOGIA

Pretendendo atingir os objetivos colocados serão analisados dois edifícios diferentes e a partir das medições de recalques tratadas, obter os parâmetros do modelo proposto por Gusmão (2006) no capítulo 3 descrito nesse trabalho. O edifício analisado chamado de Edifício A, é localizado na beira mar da cidade de Jaboatão dos Guararapes/PE e o edifício B é o edifício do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho (HUCFF), Bloco AIII.

5.1 Edifício A

O monitoramento do prédio começou em 2003 e foi até 2020, totalizando um conjunto de 68 medições. Todas as medições foram, exceto a L12, utilizadas para analisar o edifício e aplicar o modelo proposto. A medição L12 apresentava valores incomuns e por isso foi desprezada.

Para obter os resultados foram realizadas as seguintes etapas:

- a. Obter e tratar dados de medição de recalque dos pilares aferida nos edifícios antes, durante e depois da execução do reforço de fundação.
Calcular recalque parcial, velocidade e recalque total de todos os pilares (P1 a P18) e por fim, encontrar a média, desvio padrão e coeficiente de variação.
- b. Com os valores de recalque acumulado de cada pilar, de todas as medições realizadas de 29/09/2003 a 09/11/2020, foi calculado o recalque médio de todos os pilares por medição realizada. Também foi contabilizado o tempo acumulado em dias de uma medição para a outra.
- c. Com os valores de recalque de cada pilar por medição e o intervalo de tempo entre as medições também foram obtidos os valores de velocidade de recalque para cada pilar, e a velocidade média de todos os pilares por medição.

Com todos os dados tratados, pode-se aplicar o modelo proposto. Até essa etapa do trabalho, o modelo foi aplicado para dois pilares de sapatas não reforçadas (SP1 e SP2); dois pilares de sapatas reforçadas (SP11 e SP18); e para o valor médio de recalque de todos os pilares da obra.

Inicialmente serão mostrados os passos utilizados para aplicar o modelo à sapata do pilar P1, e os demais pilares seguirão os mesmos passos, porém só serão mostradas as diferenças dos valores que foram aplicados.

5.1.1 Aplicação do modelo para a sapata do P1

a. Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Separaram-se todas as medições tratadas até antes do início da execução das estacas da sapata a ser reforçada. Esse período é de 20/10/2003 a 15/07/2004, e as medições medidas nesse período foram L2 a L7. A medição L1 não foi utilizada, pois é uma medição de nivelamento. A Tabela 2 apresenta os valores das medições separadas para esse trecho.

Tabela 2 – Medições de recalque do P1 antes da execução de estacas

DATA	Recalque total (mm)		
	Medição	P1	Tempo (dias)
29/09/2003	1	0,00	0
20/10/2003	2	0,30	21
11/11/2003	3	-0,05	43
20/01/2004	4	1,35	113
19/03/2004	5	1,55	172
17/05/2004	6	1,7	231
15/07/2004	7	1,75	290

Fonte: Autora (2022)

Com base nesses valores de recalque e tempo acumulados em dias foi gerado o gráfico recalque x tempo e ajustados os pontos com uma função linear pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o Excel. A velocidade V_a é o coeficiente angular da função dada em mm/dia. A fórmula INCLINAÇÃO foi utilizada, no Excel, para encontrar a velocidade. Como os valores de recalque em mm são valores muito pequenos, todos os valores de recalque serão transformados para micra, que é o valor em milímetros multiplicado por 1000. A velocidade encontrada então é em micra/dia.

b. Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Separaram-se todas as medições entre o tempo do início da execução das estacas (t_1) e o início da incorporação das estacas e fundações existentes (t_2). Esse período é de 09/08/2004 a 13/05/2005, e as medições medidas nesse período foram L8 a L11 e L13 a L21. A Tabela 3 apresenta os valores das medições separadas para esse trecho.

Tabela 3 – Medições de recalque do P1 a partir da execução da primeira estaca até a medição antes da incorporação

Recalque total (mm)			
DATA	Medição	P1	TEMPO (dias)
09/08/2004	8	1,55	315
24/08/2004	9	2,30	330
21/09/2004	10	2,20	358
18/10/2004	11	3,25	385
04/11/2004	13	3,35	402
22/11/2004	14	3,75	420
10/12/2004	15	3,90	438
01/01/2005	16	5,05	460
16/02/2005	17	5,30	506
16/03/2005	18	6,70	534
04/04/2005	19	7,25	553
21/04/2005	20	7,80	570
13/05/2005	21	7,50	592

Fonte: Autora (2022)

Com base nesses valores de recalque e tempo acumulados em dias foi gerado o gráfico recalque x tempo e ajustados os pontos com uma função linear pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o Excel. A velocidade V_b é o coeficiente angular da função dada em mm/dia. A mesma fórmula utilizada para V_a foi utilizada, no Excel, para encontrar a V_b .

O fator de execução (μ) das estacas é a razão entre V_b e V_a , sendo μ um valor maior que 1.

c. Trecho C: durante a incorporação das Estacas da fundação existente

Separaram-se todas as medições entre o tempo de incorporação das estacas de reforço da fundação existente (t_2) e o tempo de estabilização dos recalques ($V \approx 0$). Esse período é de 13/06/2005 a 09/08/2019 e as medições medidas nesse período foram L22 a L67. Não foram utilizadas todas as medições, pois as últimas medições apresentam uma velocidade muito baixa, o que gera pontos discrepantes no gráfico, então foi necessário fazer um ajuste de acordo com cada caso analisado. Para este caso foi desprezado o valor da medição L68. Foram aplicadas as equações descritas no Capítulo 3 para esse trecho do modelo e encontrados os valores de $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right] e \Delta t$.

Com base nesses valores encontrados foi gerado o gráfico $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right] x \Delta t$ e ajustados os pontos com uma função linear pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o Excel. O coeficiente angular da função é o valor de λ . A mesma fórmula utilizada para V_a foi utilizada, no Excel, para encontrar a λ .

Após isso, é aplicado a curva calculada pelo modelo de Gusmão (2006) para realizar a comparação do comportamento do reforço executado e o calculado.

É formada uma tabela com as leituras utilizadas em cada trecho, intervalo das leituras de uma medição para outra, de todos os trechos e os recalques absolutos em cada leitura.

O trecho C apresenta leituras com intervalos de 200 dias aproximadamente da primeira leitura do trecho até a última leitura medida na obra.

Os valores de recalque para o trecho C são encontrados utilizando a equação 8, encontrada no Capítulo 3.

Com as datas consideradas e os valores de recalque em cada dia é gerado o gráfico data x recalque absoluto, que representa o modelo calculado.

5.1.2 Aplicação do modelo para a sapata do P2, P11, P18 e para o valor médio de recalque do P1 a P18

Repetiram-se todos os passos utilizados na análise da fundação do pilar P1, porém os dados de recalque e período variam em cada situação de acordo com o pilar.

5.2 Edifício B

O monitoramento do prédio começou no dia 30/09/2011 e foi até 18/04/2012, porém para a aplicação do modelo foram utilizadas somente as medições realizadas no reforço realizado com estacas raiz que aconteceu do dia 30/09/2011 a 14/12/2011.

Os mesmos passos para aplicação do modelo e análise utilizados no edifício A foram utilizados para o edifício B.

- a. Foram obtidos e tratados os dados de medição de recalque dos pilares aferida durante o reforço de fundação.
O recalque parcial, velocidade e recalque total de todos os pilares (P305, P314, P332 e P323) foram calculados e por fim, a média foi encontrada, assim como o desvio padrão e coeficiente de variação.
- b. Com os valores de recalque acumulado de quatro pilares, e as medições que aconteceram no período de 30/09/2011 a 14/12/2011, foi calculado o recalque médio dos pilares por medição realizada. Também foi contabilizado o tempo acumulado em dias de uma medição para a outra.
- c. Com os valores de recalque de cada pilar por medição e o intervalo de tempo entre as medições também foram obtidos os valores de velocidade de recalque para cada pilar, e a velocidade média de todos os pilares por medição.

O modelo foi aplicado para quatro pilares de sapatas, que foram reforçados com estacas raiz, de maneira isolada e depois considerando a média de recalques de todos os quatro pilares, para aplicar para a média.

5.2.1 Aplicação do modelo para a sapata do P305

- a. Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Separaram-se todas as medições tratadas até antes do início da execução das estacas da sapata a ser reforçada. Esse período é de 07/10/2011 a 03/11/2011. A Tabela 4 apresenta os valores das medições separadas para esse trecho.

Tabela 4 – Medições de recalque do P305 antes da execução de estacas

(Continua)

Recalque total (mm)			
DATA	Medição	P305	Tempo (dias)
07/10/2011	8	0,18	7
08/10/2011	9	0,25	8
09/10/2011	10	0,60	9
10/10/2011	11	0,80	10
11/10/2011	13	0,84	11
12/10/2011	14	0,85	12
13/10/2011	15	0,90	13
14/10/2011	16	1,00	14
15/10/2011	17	1,10	15
16/10/2011	18	1,60	16
17/10/2011	19	1,70	17
18/10/2011	20	2,00	18
19/10/2011	21	2,60	19
20/10/2011	22	2,65	20
21/10/2011	23	2,70	21
22/10/2011	24	3,20	22
23/10/2011	25	3,60	23
24/10/2011	26	3,70	24
25/10/2011	27	3,70	25
26/10/2011	28	4,25	26
27/10/2011	29	4,70	27
28/10/2011	30	5,20	28
29/10/2011	31	6,00	29
30/10/2011	32	5,90	30
31/10/2011	33	6,10	31
01/11/2011	34	6,50	32
02/11/2011	35	7,30	33
03/11/2011	36	7,60	34

Fonte: Autora (2022)

Com base nesses valores de recalque e tempo acumulados em dias foi gerado o gráfico recalque x tempo e ajustados os pontos com uma função linear pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o Excel. A velocidade V_a é o coeficiente angular da função dada em mm/dia. A fórmula INCLINAÇÃO foi utilizada, no Excel, para encontrar a velocidade. Como os valores de recalque em mm são valores muito pequenos, todos os valores de recalque serão transformados para micra, que é o valor em mm multiplicado por 1000. A velocidade encontrada então é em micra/dia.

b. Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Separaram-se todas as medições entre o tempo do início da execução das estacas (t_1) e o início da incorporação das estacas e fundações existentes (t_2). Esse período é de 04/11/2011 a 15/11/2011. A Tabela 5 apresenta os valores das medições separadas para esse trecho.

Tabela 5– Medições de recalque do P305 a partir da execução da primeira estaca até a medição antes da incorporação

Recalque total (mm)			
DATA	Medição	P305	TEMPO (dias)
04/11/2011	37	7,70	35
05/11/2011	38	8,50	36
06/11/2011	39	9,40	37
07/11/2011	40	10,00	38
08/11/2011	41	11,00	39
09/11/2011	42	12,00	40
10/11/2011	43	12,80	41
11/11/2011	44	13,00	42
12/11/2011	45	14,50	43
13/11/2011	46	14,8	44
14/11/2011	47	14,6	45
15/11/2011	48	14,6	46

Fonte: Autora (2022)

Com base nesses valores de recalque e tempo acumulados em dias foi gerado o gráfico recalque x tempo e ajustados os pontos com uma função linear pelo método dos mínimos quadrados,

utilizando o Excel. A velocidade V_b é o coeficiente angular da função dada em mm/dia. A mesma fórmula utilizada para V_a foi utilizada, no Excel, para encontrar a V_b .

O fator de execução (μ) das estacas é a razão entre V_b e V_a , sendo μ um valor maior que 1.

c. Trecho C: durante a incorporação das estacas da fundação existente

Separaram-se todas as medições entre o tempo de incorporação das estacas de reforço da fundação existente (t_2) e o tempo de estabilização dos recalques ($V \approx 0$). Esse período é de 15/11/2011 a 14/12/2011. Foram aplicadas as equações descritas no Capítulo 3 para esse trecho do modelo e encontrados os valores de $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right]$ e Δt .

Com base nesses valores encontrados foi gerado o gráfico $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right]$ x Δt e ajustados os pontos com uma função linear pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o Excel. O coeficiente angular da função é o valor de λ . A mesma fórmula utilizada para V_a foi utilizada, no Excel, para encontrar a λ .

Após isso, é aplicado a curva calculada pelo modelo de Gusmão (2006) para realizar a comparação do comportamento do reforço executado e o calculado.

É formada uma tabela com as leituras utilizadas em cada trecho, intervalo das leituras de uma medição para outra, de todos os trechos e os recalques absolutos em cada leitura.

O trecho C apresenta leituras com intervalos de 2 dias aproximadamente da primeira leitura do trecho até a última leitura medida na obra.

Os valores de recalque para o trecho C são encontrados utilizando a equação 8, encontrada no Capítulo 3.

Com as datas consideradas e os valores de recalque em cada dia é gerado o gráfico data x recalque absoluto, que representa o modelo calculado.

5.2.2 Aplicação do modelo para a sapata do P314, P332, P323 e para o valor médio de recalque do P305 a P332

Repetiram-se todos os passos utilizados na análise da fundação do pilar P305, porém os dados de recalque e período variam de acordo com cada pilar.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

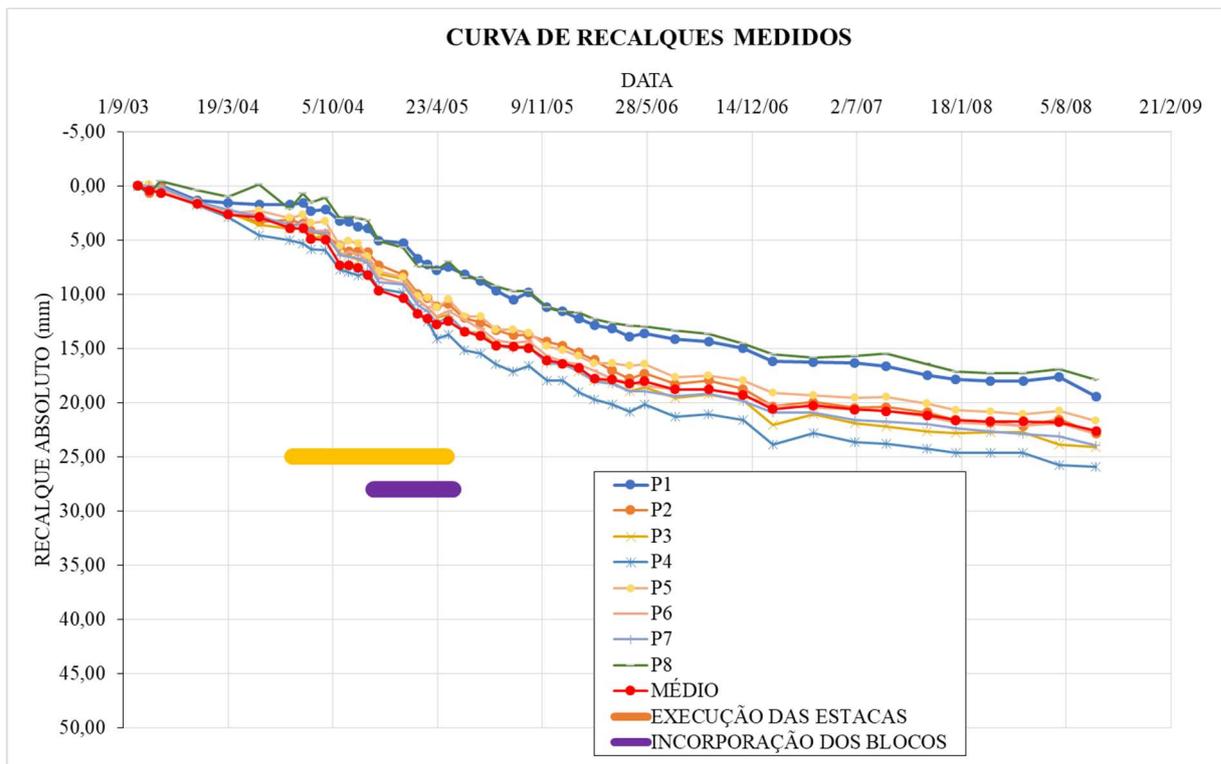
6.1 Edifício A

Após tratar os dados de recalque de todos os pilares (P1 a P18), foram calculados os valores da média de recalque e o tempo acumulado de uma medição para a outra, no quadro (Apêndice A) e os valores de velocidade de recalque, média das velocidades no quadro (Apêndice B).

A Figura 47 apresenta as curvas de recalque de 29/09/2003 a 01/10/2008 dos pilares de P1 a P8 e a média dos recalques para esse tempo. As fundações desses pilares não foram reforçadas.

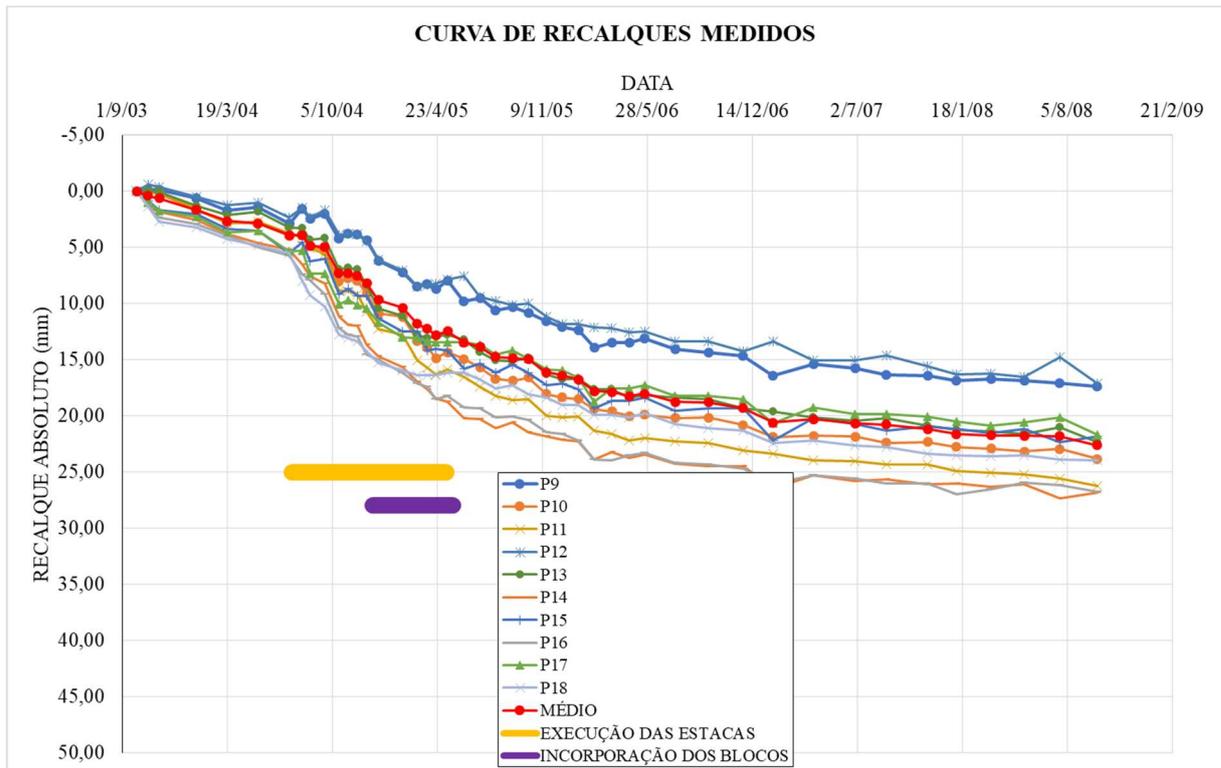
A Figura 48 apresenta as curvas de recalque de 29/09/2003 a 01/10/2008 dos pilares de P9 a P18 e a média dos recalques para esse tempo. As fundações desses pilares foram reforçadas.

Figura 47 – Curvas dos recalques medidos do P1 a P8 de 2003 a 2008



Fonte: Autora (2022)

Figura 48 – Curvas dos recalques medidos do P9 a P18 de 2003 a 2008

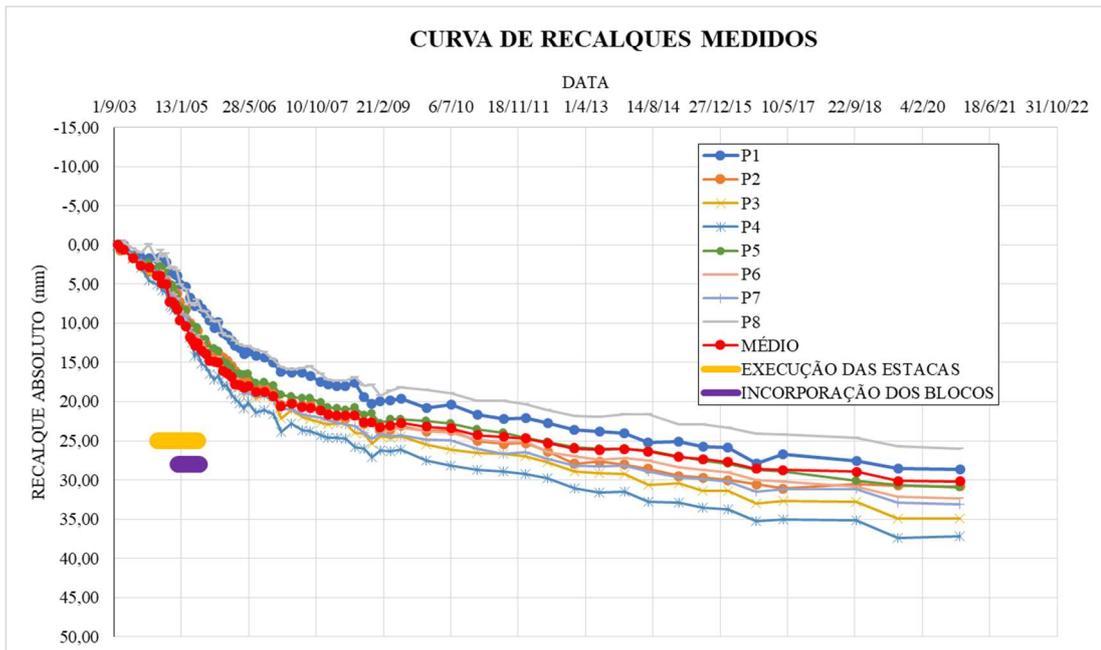


Fonte: Autora (2022)

A curva vermelha é o valor médio de recalque para esse recorte no tempo. A faixa alaranjada marca o período de tempo em que foi realizada a execução das estacas de reforço dos pilares P9 a P18, e é possível perceber um aumento da velocidade de recalque para esse trecho. A faixa roxa marca o período de incorporação dos blocos de reforço as estacas executadas. Esse trecho começa ainda quando algumas estacas estão sendo executadas. É esperado que a partir do momento da incorporação haja uma diminuição da velocidade dos recalques, e é possível entender que depois do fim da incorporação, a inclinação da curva diminui e os recalques tendem a diminuir após o dia 23/05/2005.

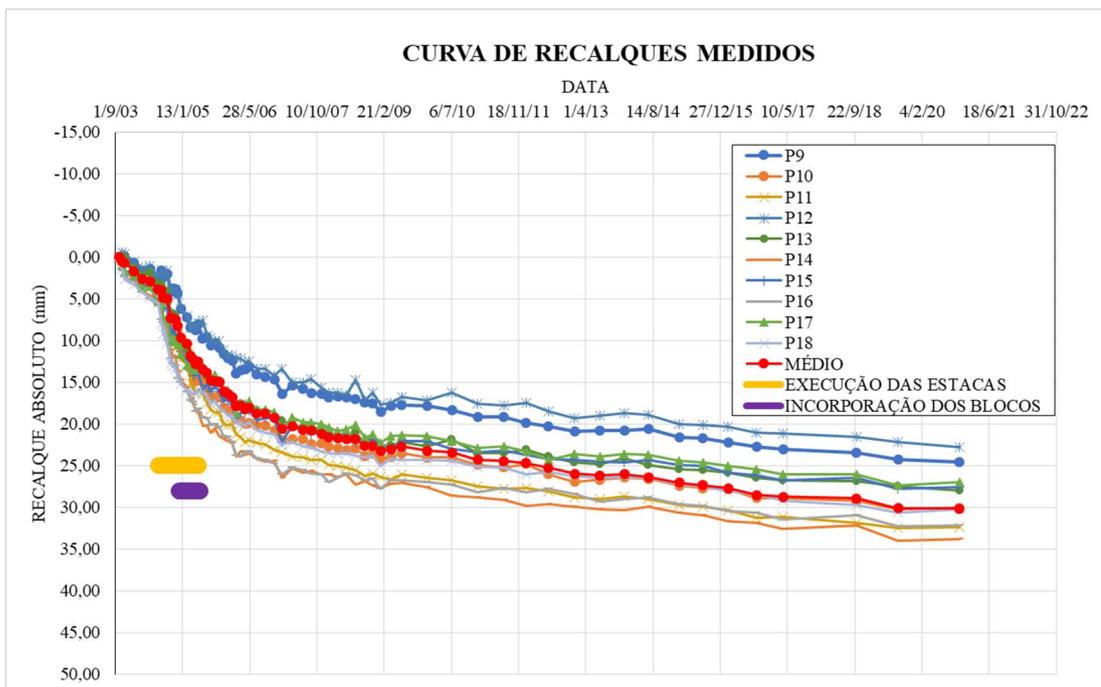
Os dois gráficos a seguir apresentam as curvas de recalque medidos de 29/09/2003 a 09/11/2020, ou seja, antes, durante, e após o reforço realizado na obra. Os pilares de P1 a P8 aparecem na Figura 49, e os pilares P9 a P18 na Figura 50.

Figura 49 – Curvas dos recalques medidos do P1 a P8 de 2003 a 2020



Fonte: Autora (2022)

Figura 50 – Curvas dos recalques medidos do P9 a P18 de 2003 a 2020



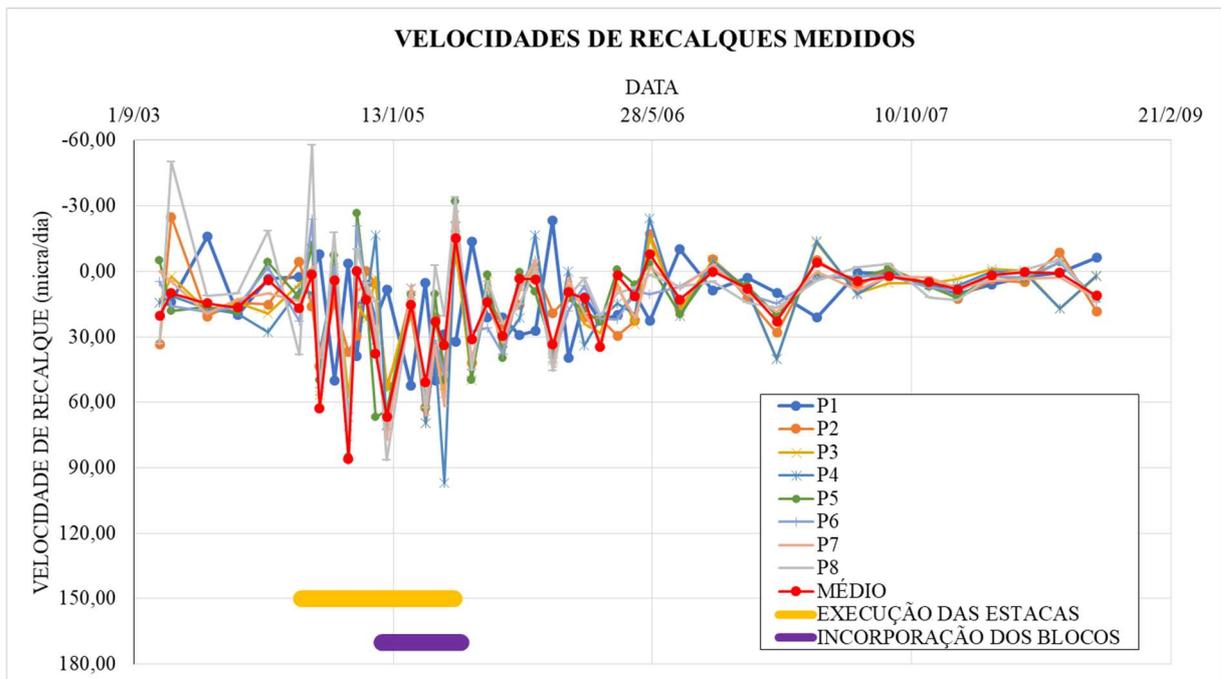
Fonte: Autora (2022)

Os dois gráficos apresentam uma curva vermelha que representa os valores de recalque médio de todos os pilares, para todas as medições realizadas. Dessa maneira é possível analisar a curva se comporta da mesma maneira como foi discutido anteriormente no recorte no tempo

até 2008. Porém agora é possível observar como os recalques continuam se comportando a partir do ano de 2008. Os recalques tendem a diminuir e se encaminham para apresentar uma velocidade nula.

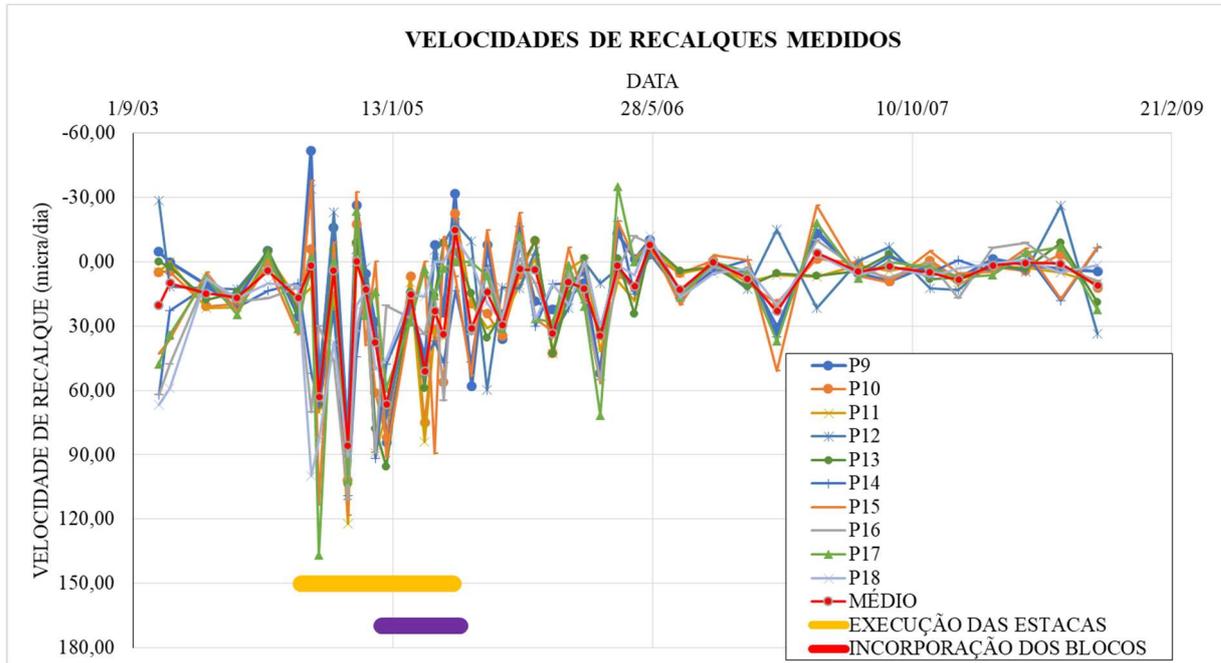
É possível perceber melhor, nos gráficos a seguir, apresentados nas Figuras 51 e 52, que foram desenvolvidos a partir dos valores encontrados no quadro (Apêndice B), e apresentam as velocidades dos recalques de todos os pilares e a velocidade média. Da mesma maneira que foi apresentado os recalques, será feito um recorte no tempo de 2003 a 2008 e os pilares não reforçados e reforçados aparecerão em gráficos diferentes.

Figura 51 – Velocidade dos recalques medidos do P1 a P8 de 2003 a 2008



Fonte: Autora (2022)

Figura 52 – Velocidades dos recalques medidos do P9 a P18 de 2003 a 2008

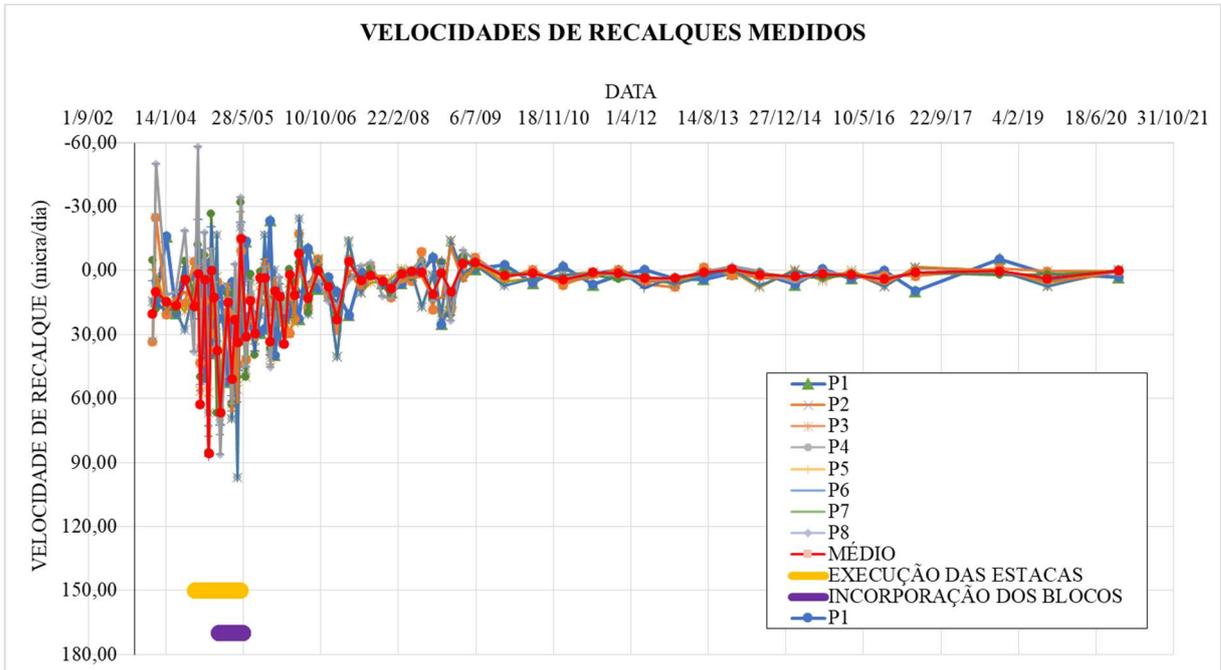


Fonte: Autora (2022)

Os valores de velocidade média antes da execução das estacas, variava pouco. A partir do início da execução das estacas, há uma variação maior, como esperado, uma aceleração do recalque. É possível perceber que na Figura 56 uma variação maior nos pilares reforçados. Em seguida, assim que a incorporação começa a acontecer, os valores ainda variam, porém cada vez menos quando se aproximam do final da incorporação dos blocos as estacas e sapatas antigas. Por fim, a variação diminui com o passar do tempo e em 2008 já começa a se assemelhar com uma reta.

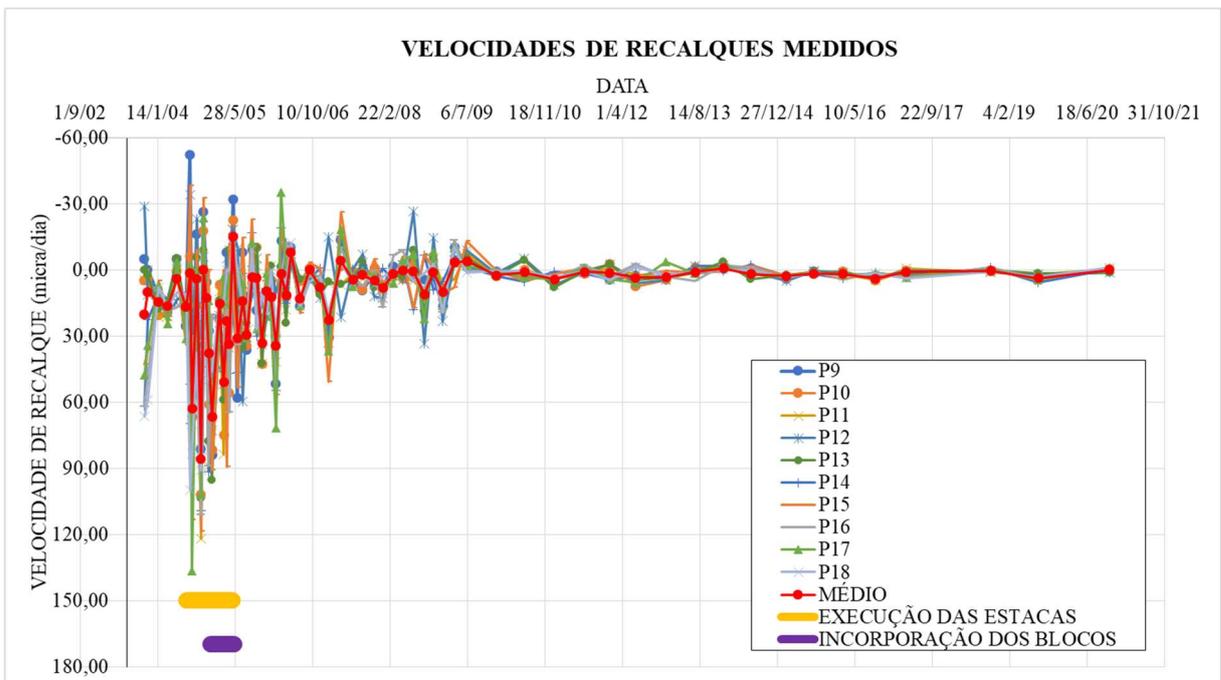
Os gráficos a seguir apresentam as curvas de velocidade de recalque medidos de 29/09/2003 a 09/11/2020, ou seja, antes, durante, e após o reforço realizado na obra. Os pilares de P1 a P8 aparecem na Figura 53, e os pilares P9 a P18 na Figura 54.

Figura 53 – Velocidades dos recalques medidos do P1 a P8 de 2003 a 2020



Fonte: Autora (2022)

Figura 54 – Velocidades dos recalques medidos do P9 a P18 de 2003 a 2020



Fonte: Autora (2022)

Os dois gráficos apresentam uma curva vermelha que representam valores de velocidade de recalque médio de todos os pilares, para todas as medições realizadas. Dessa maneira é possível analisar a curva se comporta da mesma maneira como foi discutido anteriormente no recorte no tempo até 2008. Porém agora é possível observar como a velocidade de recalque continua a se comportar a partir do ano de 2008. Observa-se que após julho de 2009 as velocidades têm variação baixa e diminuem cada vez mais com o tempo.

As velocidades negativas que aparecem nos gráficos estão provavelmente relacionadas à precisão da medição dos recalques, pois haviam intervalos pequenos entre as leituras.

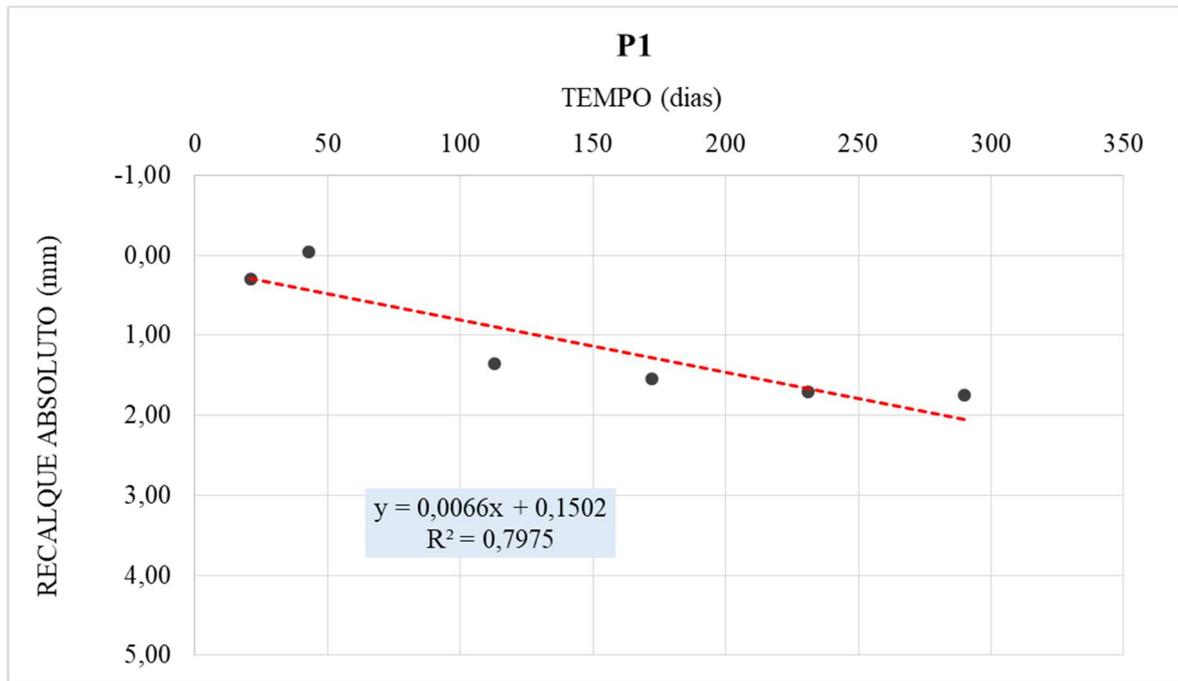
Foi realizada também uma análise em quatro pilares diferentes (P1, P2, P11, P18) e para a média de recalque de todos os pilares (P1 a P18) de maneira isolada. Após isso foi aplicado o modelo proposto por Gusmão (2006). Foram gerados então tabelas e gráfico que serão apresentados e discutidos.

6.1.1 Resultados para a sapata do P1

a. Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do P1 nas medições L2 a L7 e o tempo acumulado em dias foi gerado o gráfico da Figura 55.

Figura 55 – Tempo x recalque do trecho A para o P1



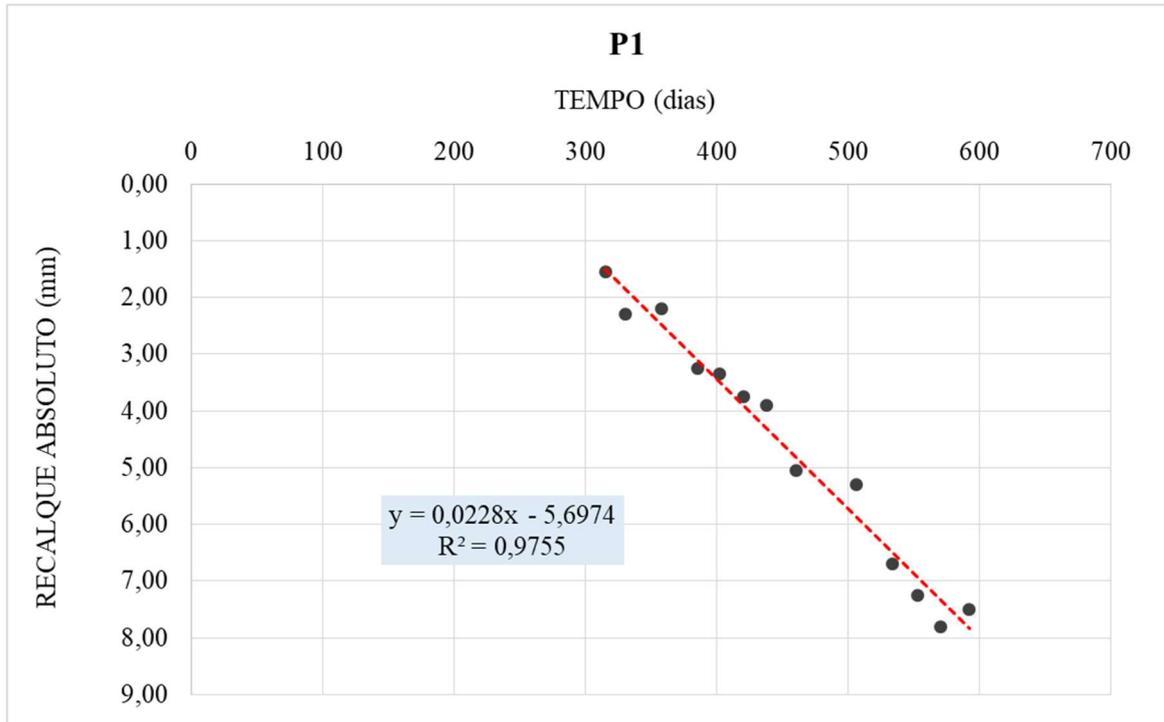
Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_a é de 6,550 micra/dia, correspondente à velocidade histórica de recalque, antes de qualquer intervenção na obra.

b. Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do P1 nas medições L8 a L21, exceto L12, e o tempo acumulado em dias foi gerado o gráfico da Figura 56.

Figura 56 – Tempo x recalque do trecho B para o P1



Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_b é de 22,859 micra/dia, correspondente à velocidade após o início da cravação das estacas até o momento antes do início incorporação das estacas aos blocos. O valor do fator μ foi de 3,49, ou seja, houve um aumento aproximado de 350% do valor da V_a .

c. Trecho C: início da incorporação até L67

Com base nos valores de recalque do P1 nas medições L22 a L67 e o tempo acumulado em dias foram encontrados os valores de $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right]$ e Δt , apresentados na Tabela 6 e na Figura 57.

Tabela 6 – Regressão linear do trecho C do P1

(Continua)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
22	0	0,0000
23	31	0,0322
24	60	0,0760

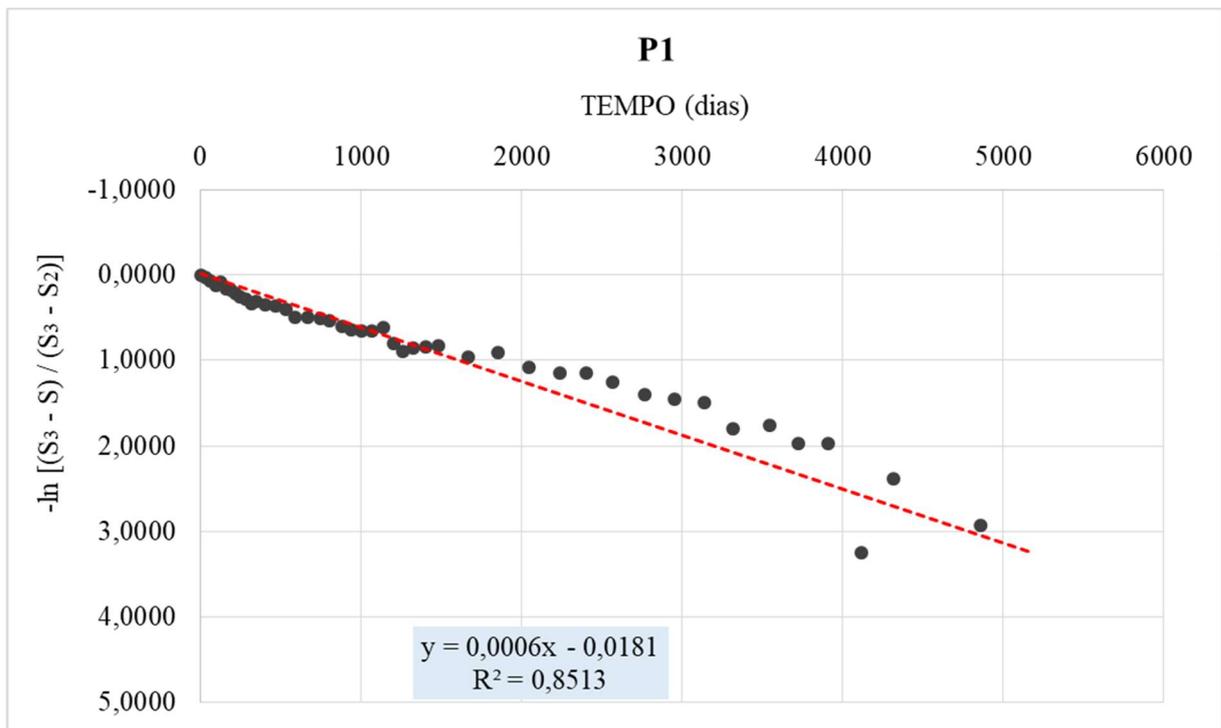
(Continua)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
25	93	0,1246
26	123	0,0866
27	157	0,1612
28	187	0,1814
29	218	0,2233
30	248	0,2606
31	282	0,2830
32	315	0,3328
33	344	0,3126
34	402	0,3465
35	466	0,3604
36	532	0,4069
37	589	0,4990
38	666	0,5030
39	745	0,5103
40	805	0,5392
41	883	0,6094
42	938	0,6395
43	1004	0,6563
44	1067	0,6600
45	1135	0,6211
46	1206	0,7986
47	1263	0,8953
48	1324	0,8520
49	1400	0,8475
50	1480	0,8249
51	1669	0,9556
52	1852	0,9122
53	2046	1,0841
54	2240	1,1512
55	2404	1,1451
56	2570	1,2501
57	2767	1,4005
58	2954	1,4492
59	3137	1,5004
60	3314	1,7991
61	3543	1,7615
62	3720	1,9691
63	3907	1,9797
64	4117	3,2557

(Conclusão)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
65	4316	2,3887
66	4862	2,9246
67	5170	5,3225

Fonte: Autora (2022)

Figura 57 – Tempo x $-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$ 

Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para λ é de $0,000630231 \text{ dias}^{-1}$.

Aplicando agora o modelo proposto por Gusmão (2006), com as datas das leituras, intervalo de tempo das medições e recalque absoluto e cada leitura, é formada a Tabela 7.

Tabela 7 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C do P1

(Continua)

Leitura	Data	T (dias)	S (mm)
L1	29/09/2003	0	0,00
L7	15/07/2004	290	1,90

(Conclusão)

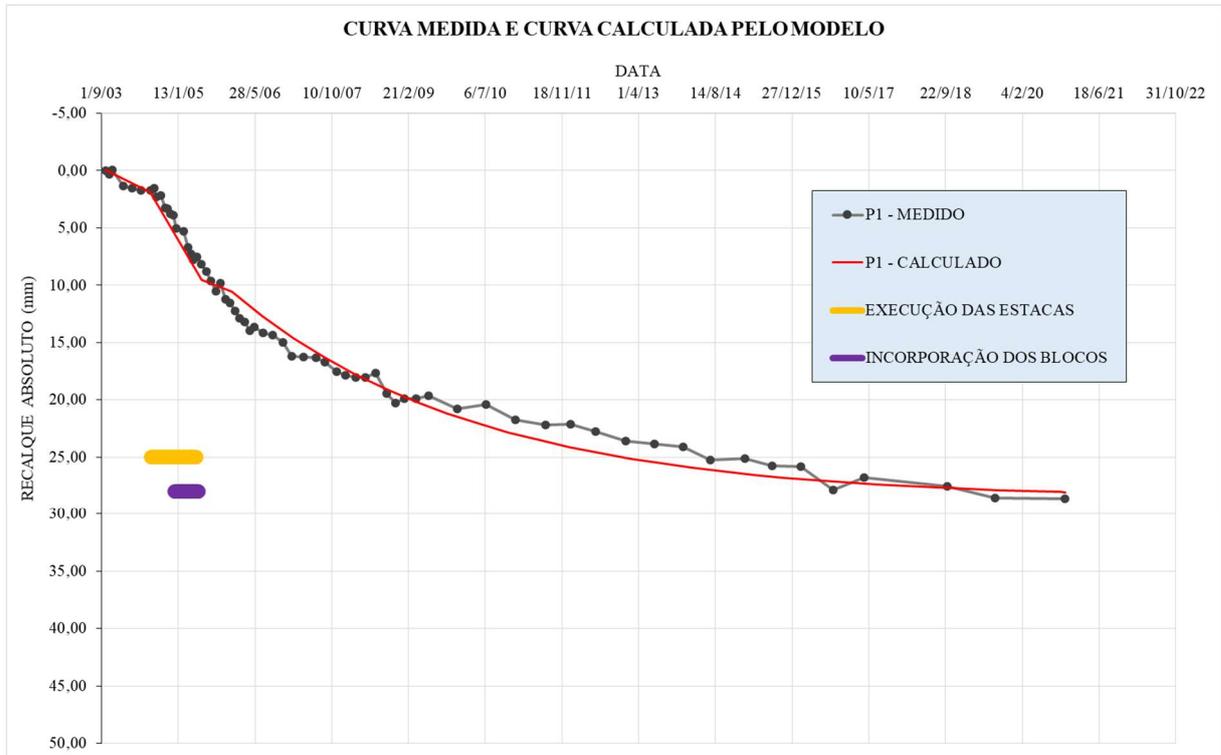
Leitura	Data	T (dias)	S (mm)
L22	13/06/2005	333	9,51
	30/12/2005	200	10,58
	18/07/2006	400	12,72
	03/02/2007	600	14,60
	22/08/2007	800	16,26
	09/03/2008	1000	17,73
	25/09/2008	1200	19,02
	13/04/2009	1400	20,16
	30/10/2009	1600	21,16
	18/05/2010	1800	22,05
	04/12/2010	2000	22,83
	22/06/2011	2200	23,52
	08/01/2012	2400	24,13
	26/07/2012	2600	24,66
	11/02/2013	2800	25,13
	30/08/2013	3000	25,55
	18/03/2014	3200	25,91
	04/10/2014	3400	26,24
	22/04/2015	3600	26,52
	08/11/2015	3800	26,77
	26/05/2016	4000	26,99
	12/12/2016	4200	27,19
	30/06/2017	4400	27,36
	16/01/2018	4600	27,51
	04/08/2018	4800	27,65
	20/02/2019	5000	27,76
	08/09/2019	5200	27,87
	26/03/2020	5400	27,96
	12/10/2020	5600	28,04
L68	09/11/2020	5628	28,05

Fonte: Autora (2022)

Os valores de L1 a L7 correspondem ao trecho A (momento antes do início do reforço na fundação); os valores de L7 a L22, exceto L12, o trecho B (durante a cravação de estacas); e a partir da L22 a L68, o trecho C (momento a partir da incorporação das estacas aos blocos até a última medição realizada).

Após definir os valores da tabela é possível elaborar o gráfico apresentado na Figura 58, com a curva formada pelo modelo proposto sobreposta aos valores medidos de recalque durante toda a obra.

Figura 58 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o P1



Fonte: Autora (2022)

Observa-se que a curva do modelo se assemelha com a curva do recalque medido na obra ao longo dos anos. Para o trecho antes da execução das estacas, as curvas se assemelham a uma reta inclinada com um ângulo menor do que a curva do trecho onde há execução de estacas, que apresenta uma inclinação maior. Logo em seguida, após a incorporação das estacas aos blocos, as curvas se assemelham a uma curva logarítmica que tendem a formar uma reta horizontal.

6.1.2 Resultados para a sapata do P2, P8, P11, P18 e média dos pilares (P1 a P18)

Os resultados para o P2, P8, P11, P18 e média dos pilares (P1 a P18) estão apresentados no Apêndice E.

6.1.3 Comparações e análises do Edifício A

Os valores de velocidade do trecho A e B, fator μ , e média para os pilares P1 a P8 são apresentados no Quadro 6. Os valores analisados consideram o trecho A até o momento antes da execução da primeira estaca do reforço; o trecho B a partir do da execução da primeira estaca até o momento antes da primeira incorporação da obra.

Quadro 6 – Valores de velocidade do trecho A e B (P1 a P8), fator μ , e média

Pilares	Trecho A	Trecho B	Trecho B
	V(micra/dia)	V(micra/dia)	μ
P1	6,55	22,85	3,49
P2	11,62	28,09	2,42
P3	14,73	29,87	2,03
P4	18,81	31,24	1,66
P5	14,73	31,55	2,14
P6	13,49	31,09	2,30
P7	13,68	33,08	2,42
P8	4,85	25,58	5,27
Média	12,31	29,17	2,72

Fonte: Autora (2022)

Comparando os valores calculados para os pilares que não foram reforçados percebeu-se que:

- Os pilares que tiveram valor de μ abaixo da média foram os pilares P4, P3, P5, P6, P2 e P7. O menor valor de μ foi o do pilar P4, o que é esperado, pois é o pilar mais distante das sapatas que foram reforçadas.
- Os pilares que tiveram valor de μ acima da média foram os pilares P8 e P1. O maior valor de μ foi do pilar P8, o que também era esperado, pois era um dos pilares mais próximos das sapatas que foram reforçadas.
- A maior velocidade do trecho B foi do pilar P7 e a maior velocidade do trecho A foi do pilar P4. O pilar P7 é um dos pilares mais próximos das sapatas que foram reforçadas. O recalque que aconteceu enquanto o trecho A foi medido não tem interferência com reforço de fundação, pois para esse trecho foram considerados os valores até o momento antes da execução das estacas.

Os valores de velocidade do trecho A e B, fator μ , e média para os pilares P9 e P18 são apresentados na Quadro 7.

Quadro 7 – Valores de velocidade do trecho A e B (P9 a P18), fator μ , e média

Pilares	Trecho A	Trecho B	Trecho B
	V(micra/dia)	V(micra/dia)	μ
P9	8,23904	27,14	3,29
P10	14,567	39,818	2,73
P11	13,924	-	-
P12	9,912	27,140	2,74
P13	11,339	38,063	3,36
P14	14,961	44,222	2,96
P15	14,318	34,205	2,39
P16	18,978	39,828	2,10
P17	14,336	27,719	1,93
P18	13,875	29,099	2,10
Média*	13,392	34,248	2,63

* Valores das médias foram obtidos sem a consideração dos resultados do pilar P11, que apresentou valores discrepantes e foram desconsiderados.

Fonte: Autora (2022)

Comparando os valores calculados para os pilares que foram reforçados percebeu-se que:

- Os pilares que tiveram valor de μ abaixo da média foram os pilares P15 a P18. O menor valor de μ foi o do pilar P17. A sapata do pilar P17+P18 foi a primeira a ter suas estacas executadas e ficaram aguardando a sua incorporação no espaço de tempo de cinco medições e foram as primeiras a serem executadas. Nesse espaço de tempo enquanto aguardavam a incorporação, foi realizada a execução das estacas das sapatas P15+ P16 que eram as mais próximas.
- Os pilares que tiveram valor de μ acima da média foram os pilares P9 a P14. O maior valor de μ foi do pilar P13, o que é esperado, pois é um pilar está locado próximo dos pilares P15 a P18, que foram reforçadas aproximadamente no mesmo tempo, antes de qualquer incorporação realizada na obra.
- A maior velocidade do trecho B foi do pilar P14, que apresentou maior velocidade durante a execução das estacas, e a maior velocidade do trecho A foi do pilar P16, que recalava com maior velocidade antes da execução do reforço. O recalque que

aconteceu enquanto o trecho A foi medido não tem interferência com reforço de fundação, pois para esse trecho foi considerado os valores até o momento antes da execução das estacas.

Comparando os valores de todos os pilares analisados, percebeu-se que:

- O maior valor de μ foi do pilar P8 e o menor valor foi do pilar P4. O pilar P8 encontra-se próximo as sapatas reforçadas e o P4, mais distante delas.
- A média da velocidade de recalque do trecho A é maior para os pilares que foram reforçados do que média de velocidade de recalque do trecho A dos pilares não reforçados. A média da velocidade de recalque no trecho B é maior para os pilares que foram reforçados do que a média de velocidade de recalque do trecho B para os pilares não reforçados. É esperado que no trecho B, a execução de estacas aumentasse a velocidade de recalque.
- A média do valor de μ é praticamente igual para os pilares não reforçados e para os reforçados, o que reforça a importância da aceleração dos recalques durante execução das estacas, mesmo para pilares não reforçados.
- A maior velocidade encontrada para o trecho B, foi do P14 e para o trecho A foi do P16, ambos pilares do grupo de sapatas reforçadas.

Os valores de velocidade do trecho A e B, fator μ , λ e média para os pilares P1, P2, P11 e P18 são apresentados na Quadro 8. Os valores analisados consideram o trecho A até o momento antes da execução da estaca da sapata em questão; o trecho B a partir da execução da estaca da sapata até o momento antes da incorporação do pilar analisado; e o trecho C a partir da incorporação. O cronograma do reforço da fundação é apresentado no quadro (Apêndice F).

Quadro 8 – Valores de velocidade do trecho A e B (P1, P2, P11 e P18), fator μ , λ e média

Pilares e média	Trecho A	Trecho B	Trecho B	Trecho C
	V(micra/dia)	V(micra/dia)	μ	$\lambda(t^{-1})$
Não reforçados				
P1	6,55	22,85	3,49	0,0006302
P2	11,62	28,09	2,42	0,0006497
Reforçados				
P11	28,12	-	-	-
P18	13,87	51,45	3,71	0,0004134
Média de todos os pilares				
Média*	10,68	34,13	3,21	0,00056

*Valores das médias foram obtidos sem a consideração dos resultados do pilar P11, que apresentou valores discrepantes e foram desconsiderados.

Fonte: Autora (2022)

Comparando os valores calculados para os pilares percebeu-se que:

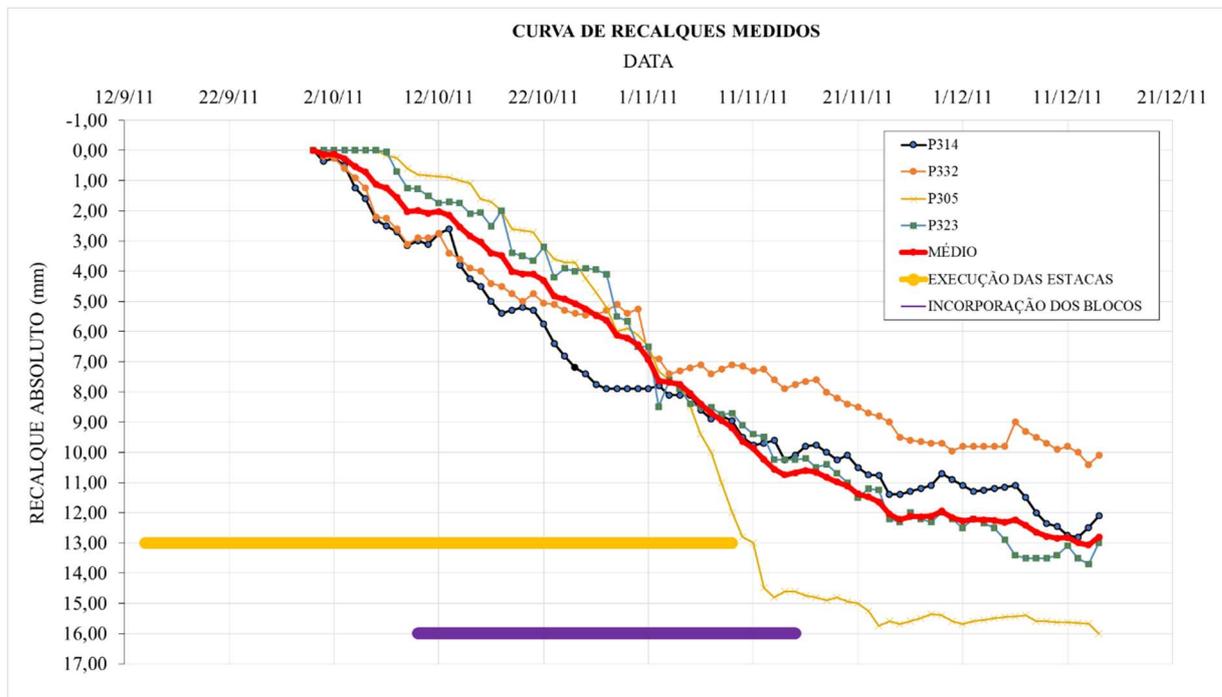
- O pilar que apresentou valor de μ abaixo da média e menor valor de μ foi o pilar P2.
- Os pilares que tiveram valor de μ acima da média foram os pilares P18 e P1. O maior valor de μ foi do pilar P18, o que era esperado, pois é um pilar que foi reforçado e está próximo, de outros pilares que foram reforçados também.
- A maior velocidade do trecho B foi do pilar P18 e a maior velocidade do trecho A foi do pilar P11. Velocidades de recalques maiores nos pilares reforçados era esperado, devido a cravação de estacas no solo.
- A menor velocidade do trecho B e A foi do pilar P1. O pilar P1 estava mais distante das sapatas reforçadas.
- Os pilares que tiveram o valor de velocidade de recalque acima da média, no trecho A foram os pilares P11 e P18, já para o trecho B, foi o pilar P18. Todos pilares que foram reforçados.
- O menor valor de λ encontrado foi do pilar P18 e o maior do pilar P2. Os pilares que apresentaram valor de λ acima da média foram os pilares P1 e P2.

6.2 Edifício B

Após tratar os dados de recalque de todos os pilares (P314, P332, P305, P323), foram calculados os valores da média de recalque e o tempo acumulado de uma medição para a outra, no quadro (Apêndice C) e os valores de velocidade de recalque, média das velocidades no quadro (Apêndice D).

A Figura 59 apresenta as curvas de recalque de 30/09/2011 a 14/12/2011 dos pilares de P314, P332, P305, P323 e a média dos recalques para esse tempo. As fundações desses pilares foram reforçadas com estacas raiz.

Figura 59 – Curvas dos recalques medidos do P314, P332, P305, P323 do período medido



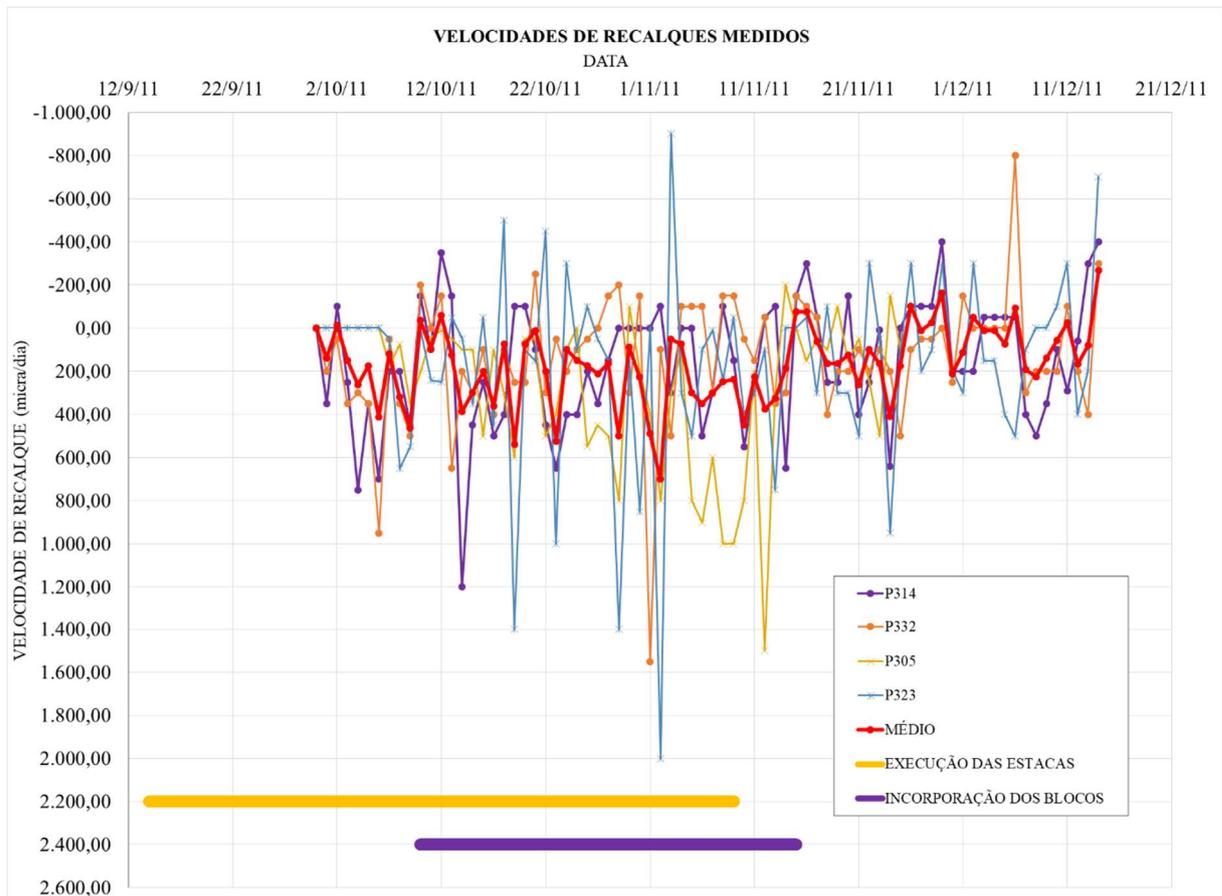
Fonte: Autora (2022)

A curva vermelha é o valor médio de recalque para o período medido. A faixa alaranjada marca o período de tempo em que foi realizada a execução das estacas de reforço dos pilares, e é possível perceber que a execução das estacas começou antes do período de acompanhamento e medição de recalques. Nesse período percebe-se que a inclinação da curva vermelha, que mostra o recalque médio, tende a uma reta. A faixa roxa marca o período de incorporação dos blocos de reforço e as estacas executadas. Esse trecho começa ainda quando algumas estacas estão sendo executadas. É esperado que a partir do momento da incorporação haja uma

diminuição da velocidade dos recalques, e é possível entender que depois do fim da incorporação, a inclinação da curva diminui e os recalques tendem a diminuir após o dia 11/11/2011.

É possível perceber melhor, nos gráficos a seguir, apresentados nas Figuras 60, que foram desenvolvidos a partir dos valores encontrados no quadro (Apêndice D), e apresentam as velocidades dos recalques de todos os pilares e a velocidade média.

Figura 60 – Velocidade dos recalques medidos do P314, P332, P305, P323 do período medido



Fonte: Autora (2022)

A partir do início da execução das estacas, os valores de velocidade variam bastante, como esperado, acontece uma aceleração do recalque. Em seguida, assim que a incorporação termina, os valores ainda variam, porém cada vez menos e com o tempo a variação diminui, a partir do dia 21/11/2011 a velocidade tende a se tornar mais estável.

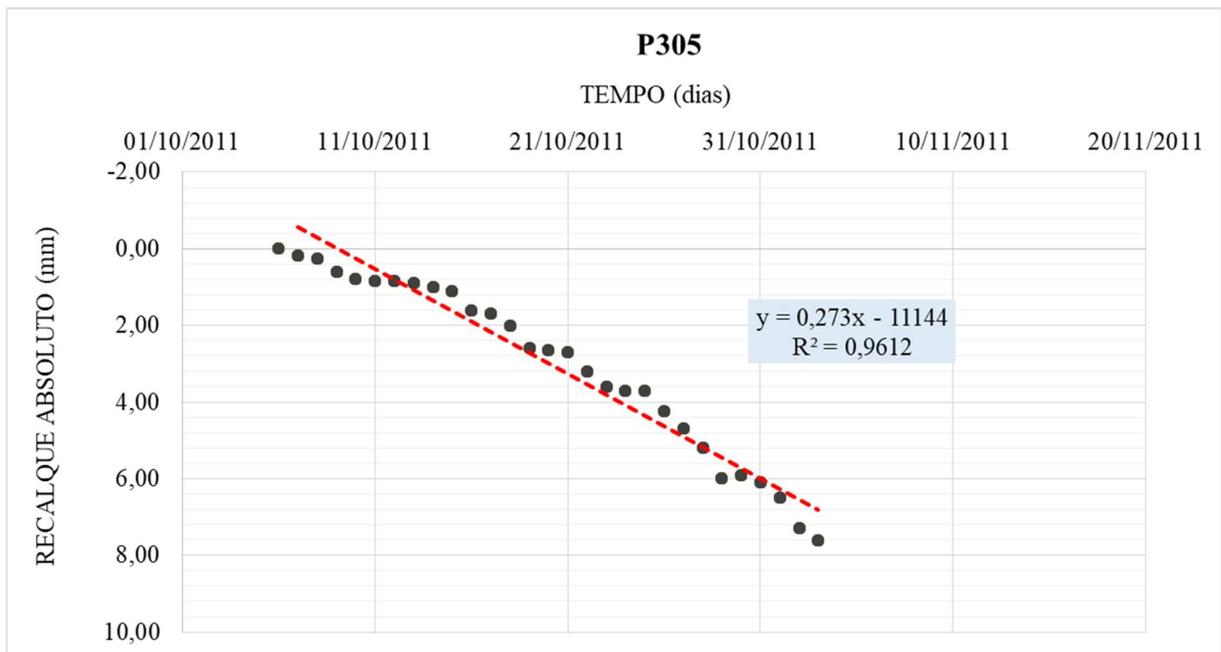
Foi realizada também uma análise em quatro pilares diferentes (P314, P332, P305, P323) e para a média de recalque de todos os quatros pilares de maneira isolada. Após isso foi aplicado o modelo proposto por Gusmão (2006). Foram gerados então tabelas e gráfico que serão apresentados e discutidos.

6.2.1 Resultados para a sapata do P305

a. Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do P305 e o tempo acumulado em dias foi gerado o gráfico da Figura 61.

Figura 61 – Tempo x recalque do trecho A para o P305



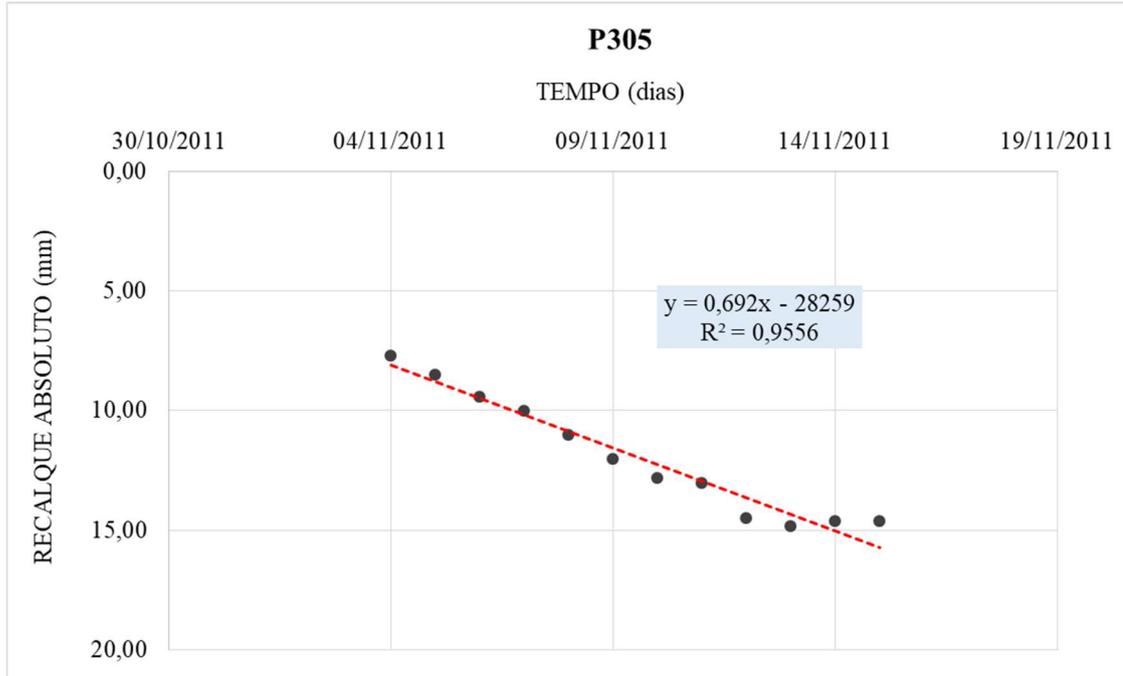
Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_a é de 272,965 micra/dia, correspondente à velocidade histórica de recalque, antes de qualquer intervenção na obra.

b. Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do P305 e o tempo acumulado em dias foi gerado o gráfico da Figura 62.

Figura 62 – Tempo x recalque do trecho B para o P305



Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_b é de 691,958 micra/dia, correspondente à velocidade após o início da cravação das estacas até o momento antes do início incorporação das estacas aos blocos. O valor do fator μ foi de 2,53, ou seja, houve um aumento aproximado de 253% do valor da V_a .

c. Trecho C: início da incorporação

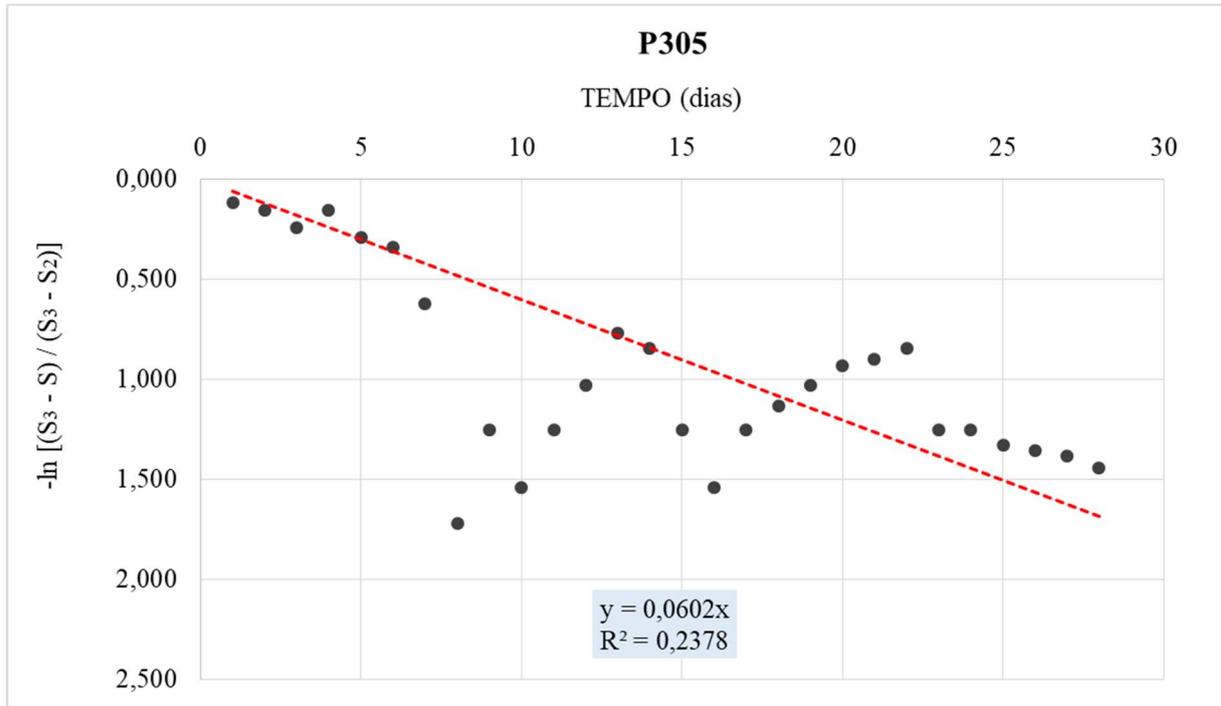
Com base nos valores de recalque do P305 e o tempo acumulado em dias foram encontrados os

valores de $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right]$ e Δt , apresentados na Tabela 8 e na Figura 63.

Tabela 8 – Regressão linear do trecho C do P305

Δt (dias)	$-\ln (S_3- S)/(S_3-S_2)$
1	0,1133
2	0,1542
3	0,2412
4	0,1542
5	0,2877
6	0,3365
7	0,6242
8	1,7228
9	1,2528
10	1,5404
11	1,2528
12	1,0296
13	0,7673
14	0,8473
15	1,2528
16	1,5404
17	1,2528
18	1,1350
19	1,0296
20	0,9343
21	0,8986
22	0,8473
23	1,2528
24	1,2528
25	1,3307
26	1,3581
27	1,3863
28	1,4451

Fonte: Autora (2022)

Figura 63 – Tempo x $-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$ 

Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para λ é de $0,06020 \text{ dias}^{-1}$.

Aplicando agora o modelo proposto por Gusmão (2006), com as datas das leituras, intervalo de tempo das medições e recalque absoluto e cada leitura, é formada a Tabela 9.

Tabela 9 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C do P305

(Continua)

Data	T (dias)	S (mm)
06/10/2011	0	0,00
04/11/2011	29	7,92
09/11/2011	5	11,38
11/11/2011	2	14,76
13/11/2011	4	14,90
15/11/2011	6	15,02
17/11/2011	8	15,14
19/11/2011	10	15,23
21/11/2011	12	15,32
23/11/2011	14	15,40
25/11/2011	16	15,47
27/11/2011	18	15,53

(Conclusão)

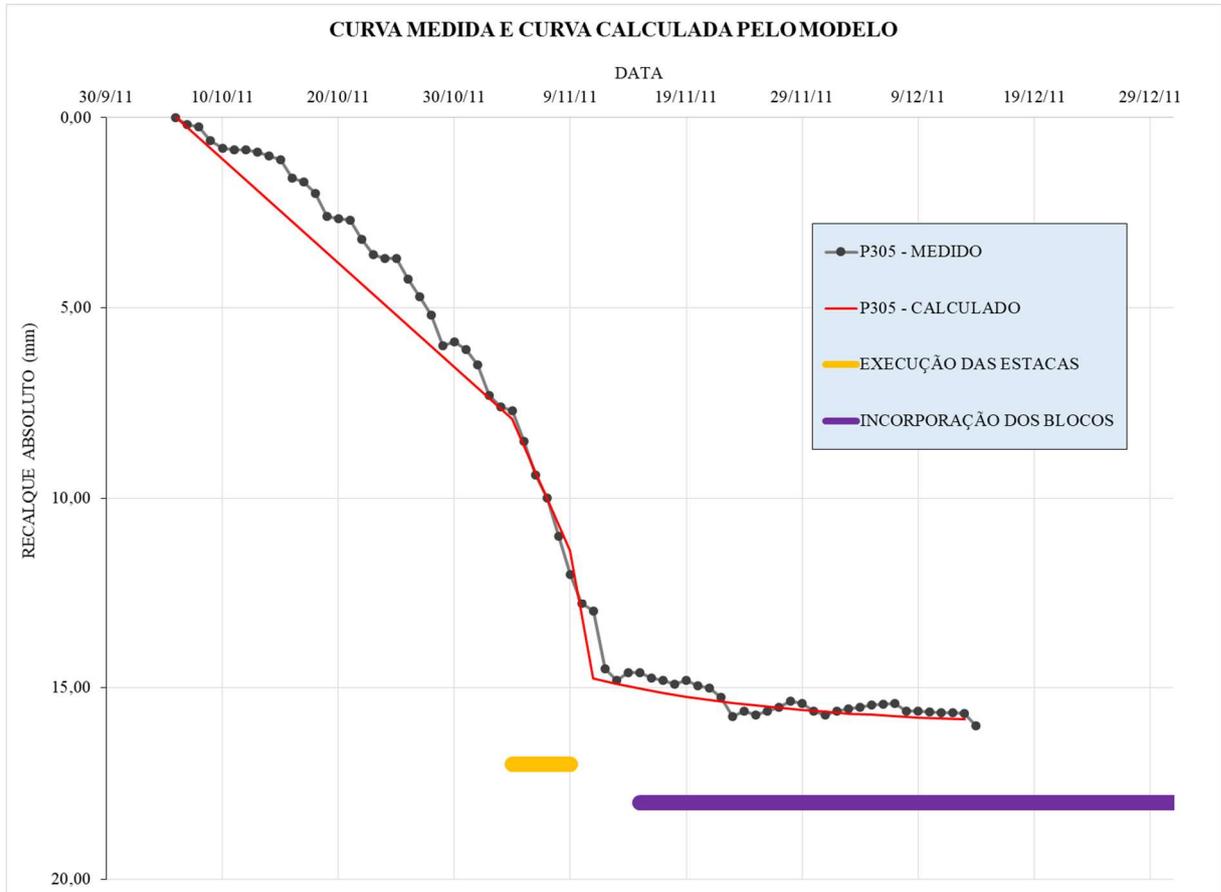
Data	T (dias)	S (mm)
29/11/2011	20	15,58
01/12/2011	22	15,63
03/12/2011	24	15,67
05/12/2011	26	15,71
07/12/2011	28	15,74
09/12/2011	30	15,77
11/12/2011	32	15,80
13/12/2011	34	15,82

Fonte: Autora (2022)

Os valores de recalque de 06/10/2011 a 04/11/2011 correspondem ao trecho A (momento antes do início do reforço na fundação); os valores de recalque de 04/11/2011 a 09/11/2011, o trecho B (durante a cravação de estacas); e a partir de 11/11/2011 a 13/12/2011, o trecho C (momento a partir da incorporação das estacas aos blocos até a última medição realizada).

Após definir os valores da tabela é possível elaborar o gráfico apresentado na Figura 64, com a curva formada pelo modelo proposto sobreposta aos valores medidos de recalque durante toda a obra.

Figura 64 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o P305



Fonte: Autora (2022)

Observa-se que a curva do modelo se assemelha com a curva do recalque medido na obra ao longo do período de observação dos recalques. Para o trecho antes da execução das estacas, as curvas se assemelham a uma reta inclinada com um ângulo menor do que a curva do trecho onde há execução de estacas, que apresenta uma inclinação maior. Logo em seguida, após a incorporação das estacas aos blocos, as curvas se assemelham a uma curva logarítmica que tendem a formar uma reta horizontal.

6.2.2 Resultados para a sapata do P314, P332, P323 e média de todos pilares

Os resultados para o P314, P332, P323 e média de todos os pilares estão apresentados no Apêndice E.

6.2.3 Comparações e análises do Edifício B

Os valores de velocidade do trecho A e B, fator μ , λ e média para os pilares P305, P314, P332, P323 e média de todos os pilares são apresentados na Quadro 9. Os valores analisados consideram o trecho A até o momento antes da execução da estaca da sapata em questão; o trecho B a partir da execução da estaca da sapata até o momento antes da incorporação do pilar analisado; e o trecho C a partir da incorporação. O cronograma do reforço da fundação é apresentado no quadro (apêndice G).

Quadro 9 – Valores de velocidade do trecho A e B (P305, P314, P332, P323, média de todos pilares), fator μ , λ

Pilares e média	Trecho A	Trecho B	Trecho B	Trecho C
	V(micra/dia)	V(micra/dia)	μ	$\lambda(t^{-1})$
Reforçados com estaca raiz				
P314	265	262,698	0,99	0,0304
P332	-	362,727	-	0,0457
P305	272,965	691,958	2,53	0,0602
P323	194,19	325,645	1,68	0,0861
Média de todos os pilares (estaca raiz)				
Média	244,052*	426,767	1,73*	0,0589

*Valores das médias foram obtidos sem a consideração dos resultados do pilar P332, que apresentou valores discrepantes e foram desconsiderados.

Fonte: Autora (2022)

Comparando os valores calculados para os pilares percebeu-se que:

- Como não houve medição antes do início do reforço, não foi possível calcular a velocidade no trecho A (antes da execução de estacas) e o valor de μ para a média e para o pilar P332.
- Todos os pilares apresentaram velocidade no trecho B maior que a média de pilares.
- A maior velocidade do trecho B foi do pilar P305 e a maior velocidade do trecho A foi do pilar P305. Esse pilar recalrava mais rápido antes do reforço e foi o último a ser

incorporado nesse grupo, então além de estar recalçando rápido antes, ele recebeu a influência da execução das estacas dos três pilares antes dele, o que provavelmente contribuiu para o aumento da velocidade de recalque no trecho B.

- A menor velocidade do trecho B foi do pilar P314 e a menor velocidade do trecho A foi do pilar P323. O P314 foi o segundo a ser incorporado e tinha a segunda menor velocidade no trecho A.
- O menor valor de λ encontrado foi do pilar P314 e o maior do pilar P323. O pilar que apresentou valor de λ acima da média foi o pilar P323.

6.3 Apresentação e análise do edifício A e B

O Quadro 10 apresenta um resumo de informações importantes sobre a obra de fundação realizada nos dois edifícios. A ideia é iniciar um banco de dados com os parâmetros e informações de cada obra em que o modelo foi aplicado.

Quadro 10 – Resumo de informações gerais do reforço de fundação dos edifícios A e B

Estaca	Tipo de estaca	Comp (m)	Quant. Por pilar	Diâmetro (mm)	Recalque total aprox. (mm)	Tempo total aprox. (mês)	Vel. Total aprox. (mm/mês)	$\lambda(t-1)$
A	Microestacas injetadas autoperfurantes	28	Média 17	310	20	36	0,556	0,00056
B	Raiz	16	6	410	12,8	2,5	5,12	0,0589
			8	310				
	Mega	7 a 10	2	WP-200-53	-	-	-	-

Fonte: Autora (2022)

Os valores de recalque e tempo foram encontrados a partir de análise dos gráficos de recalque x tempo dos dois edifícios, os valores de $\lambda(t^{-1})$ foram encontrados a partir do modelo aplicado e as demais informações estão descritas no capítulo 4.

O modelo foi aplicado para estacas raiz e microestacas injetadas autoperfurante. As duas apresentam uma execução similar, perfuração do solo com uma camisa metálica e a injeção da argamassa posteriormente.

Analisando agora de uma outra perspectiva, através do Quadro 11, que apresenta um resumo de informações sobre a velocidade antes e depois da execução das estacas, valor de μ , λ (t^{-1}) e o tempo.

Quadro 11– Comparação de variáveis dos edifícios A e B

	Edifício A	Edifício B (pilares com estaca raiz)
Vel. Méd. A (micra/dia)	10,68	244,052
Vel. Méd. B (Parcial) (micra/dia)	34,13	426,767
μ	3,21	1,73
$\lambda(t^{-1})$	0,00056	0,0589
Tempo (mês)	36	2,5

Fonte: Autora (2022)

A ideia é a mesma do Quadro 10, iniciar um banco de dados com os parâmetros de cada obra em que o modelo foi aplicado.

7 CONCLUSÕES

O modelo proposto por Gusmão (2006) funciona satisfatoriamente, se adequando à curva medida de recalques na obra do edifício A e B, em todos os pilares e para a média de pilares, como foi observado em todos os gráficos apresentados.

7.1 Edifício A

Nos cenários que se analisou, considerando todos os pilares da obra, para os trechos A e B, os valores de velocidade de recalque e o fator μ , observou-se que:

- a) O grupo de pilares reforçados apresenta maior valor médio de velocidade de recalque para o trecho A, o que indica que esses pilares estavam recalcando mais rápido em relação os pilares da parte superior da planta. E no trecho B o grupo de pilares reforçados também apresenta maior valor médio de velocidade de recalque, o que indica, mesmo que a cravação de estacas interfira em sapatas que não foram reforçadas, quanto mais próximo do reforço de fundação maior a influência.
- b) A execução do reforço impacta mais nos pilares que estão mais próximos e menos nos pilares mais distante, pois foi visualizado que pilares não reforçados que estavam perto dos reforçados tiveram um aumento da velocidade de recalque após o início do reforço.
- c) Todos os pilares apresentaram V_b maior que a V_a , pois pilares não reforçados apresentaram aumento de velocidade de recalque durante o reforço.

7.2 Edifício B

Nos cenários que se comparou, considerando os pilares P305, P314, P323, P332 e a média de todos os pilares desse grupo, para os trechos A, B e C, os valores de velocidade de recalque, fator μ e λ , observou-se que:

- a) Os pilares que foram incorporados primeiro apresentaram menor valor de μ . O que sugere que eles tiveram um crescimento menor de velocidade quando comparado com os demais.

- b) O acréscimo de velocidade após o início do reforço é maior para os pilares incorporados por último, ou seja, apresentaram valor maior de μ .
- c) Sugere-se que a ordem de incorporação das estacas influencia no valor do parâmetro μ .

7.3 Comparando os resultados do edifício A e edifício B

Nos cenários que se comparou, considerando a aplicação e análise do modelo para os edifícios A e B, observou-se que:

- a) O modelo foi aplicado para estacas raiz e microestacas injetadas autoperfurante. No edifício A o comprimento de estaca foi de 28 metros e as estacas raiz, no edifício B, 16 metros. Neste caso, quanto maior a estaca maior o atrito e menor a velocidade de recalque. Isso confirmou-se na análise, pois o edifício com comprimento e quantidade maior de estacas apresentou uma velocidade menor de recalque.
- b) No edifício em que o reforço aplicado no modelo de Gusmão apresentou valores de λ maiores, o tempo até a estabilização da fundação foi menor e o contrário é verdadeiro, pois o edifício A apresentou um menor valor de λ e um tempo maior até a estabilização. Quanto mais rígido o reforço, maior a velocidade de recalque e menor o tempo até a estabilização.
- c) Analisando os gráficos chegou-se à conclusão que λ é um medidor de velocidade, pois quando o valor de λ é alto, a velocidade de recalque é maior e o tempo até a estabilização menor. E quando é baixo, a velocidade é menor e o tempo de estabilização maior.
- d) A análise dos valores de λ auxilia na escolha do tipo de reforço, quando se decide, analisando o caso do edifício a ser reforçado, se é preferível que o edifício recalque de maneira lenta em um intervalo de tempo maior ou se é preferível que sua estabilização ocorra em um intervalo de tempo menor, considerando que os recalques serão acelerados.

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Elaborar um banco de dados de obras com reforço de fundações diferente dos apresentados nesse trabalho, estudando a aplicabilidade do modelo de Gusmão (2006);
- Elaborar um compilado dos parâmetros encontrados nesse trabalho como (μ , λ , velocidades de recalque) para obras com reforços de fundações diferentes, comparando com o tipo de solo e reforço de fundação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, 2022. p.8-9.

BROMS, B. B.; Expander bodies - A new concept for underpinning of structures, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. *In* 11th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1985, San Francisco. **Anais [...]** San Francisco, 1985 p. 1531-1534.

COELHO, J. A.; OLIVEIRA, P. B. Estudo da conformidade dos parâmetros adotados na escolha do tipo de fundação das obras de Urugaçu/GO. *In* CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DE ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 1, 2019, Palmas. **Anais[...]**. Tocantins, 2019.p.1-5.

DE SEIXAS, A., DE SEIXAS, J. R., & DE SEIXAS, J. J. Auscultação geodésica no controle de recalque da fundação de edifício predial de grande porte. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.15(2), p. (277-298), 2009.

DIAS, F. M. **Aspectos técnicos e construtivos do projeto de reforço das fundações do HUCFF**. Dissertação (Mestrado em Projetos de Estruturas) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projetos Estruturais, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

DONADON, E. F. **Comportamento de estacas “Mega” de concreto implantadas em solo colapsível**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia civil, Arquitetura e urbanismo, Campinas, São Paulo, 2009.

ENSOLO Engenharia de Solos e Fundações. Relatório fotográfico da obra número 2675, **Execução dos consolos para permitir a ação dos macacos**, 2006. Disponível em: <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/2SPPC.2017.040>. Acesso em: 11 mai. 2022.

GUO, W.; HU, B.; ZHANG, J.; CHEN, O.; JIA, X.; LI, J. Research on the Settlement Regulation and Stability of Large Building Foundation over Gobs: A Case Study in the Xiangcheng Coal Mine, China, **Shock and Vibration**, vol. 2021, p.(2-16), 2021.

GUSMÃO, A. D. **Reforço de Fundações**. Palestra no curso de especialização em geotecnia e fundação. FESP. São Paulo, 2006

GUSMÃO, A. D., GUSMÃO FILHO, J. A., MAIA, G.B., OLIVEIRA Jr, R.F. Reforço das fundações de um edifício alto na região metropolitana do Recife. *In* XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 14, 2008, Búzios. **Anais[...]**. Rio de Janeiro, 2018. p.1-7.

HACHICH, W. *et al.* **Fundações: Teoria e prática**. 2ª Edição. São Paulo: Editora Pini, 1998.

LOPES, F. R.; D’HYPPOLITO, L. C. B. S.; DANZIGER, F. A. B.; BECKER, L.B. Settlements during Underpinning with Different Processes: Case of a Hospital in Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 146, n. 6, p. 05020003, 2020.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. **Patologia das fundações**. 1ª reimpressão. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

OLAVO, L. H. F.; GAZDA, R. J.; GAZDA, M. Reforço da ponte Manoel Ribas. **Revista técnico-científica do CREA-PR**. Edição Especial 2º SPPC, p. (1-16), 2017.

OLIVEIRA JUNIOR, R.F. **Desempenho de um edifício de múltiplos andares com ênfase nos efeitos de interação solo-estrutura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade do Pernambuco, Recife, Brasil, 2010.

ORANGE, M. J.; BUUSHEHRI, R.; MOTAMED, R.; PRABHAKARAN, A.; AHMED, E. An experimental evaluation of helical piles as a liquefaction-induced building settlement mitigation measure, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, v.151, p.(1-15), 2021.

PEREIRA, R.; LUCENA, P. H.; CARMO, A. K. F. Estudo de caso: Reforço de obra de arte especial com o uso de estaca mega. *In XII CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS*, 12, 2021, Minas Gerais. **Anais[...]**. Minas Gerais, 2021.p.1-9.

REBÊLO T. S.; DANZIGER, F. A. B.; DIAS, P. H. V. Estudo de caso de uma obra e reforço de fundações. *In 9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia*, 9, 2019, São Paulo. **Anais[...]**. São paulo, 2019. p.1-10.

SALES, M. M.; COSTA, W. L. . Dois Casos Históricos de Reforço de Fundações. *In: 3 SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA*, 1 1996, São Paulo. **Anais do Congresso[...]**, São Paulo 1996. p. 243-254.

SANTOS JÚNIOR, A. P. **Jet-Grouting: reforço de fundação de um edifício assente sobre solos moles**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto superior de engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2018.

SILVA, A. S.; SILVA, W. H.; BERTEQUINI, A. B. T. Patologias e reforço de fundações com estudo de caso utilizando o método de estacas mega. *In XVIII ENPEX UNITOLEDO*, 18, 2018, Araçatuba. **Anais[...]**. São paulo, 2018. p.2-18.

SILVA, R. R. C. Verificação do desempenho das estacas injetadas autoperfurantes executadas em solos arenosos para construção de usina eólica. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 13, n. 2, 2017.

SILVA, R. R. C.; NASCIMENTO, A. M. A.; FERRAUDO, B. C.; SILVA, L. G. A. Previsão da capacidade de carga horizontal em estacas injetadas autoperfurantes executadas em solos arenosos, **Brazilian Journal of Development**, v.7, p. (71475-71491), 2021.

SOUZA, L. C. B. **Análise dos recalques das fundações do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

VELLOSO, D. d., & LOPES, F. d. **Fundações**. Vol 1. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2012.

XIUPING, M; Design discussion of foundation reinforcement for a school canteen building, **E3S Web of Conferences**, v. 165, p.(1-4), 2020.

ZHOU, D.; FENG, C.;LI, L.; ZHOU, Y.; ZHU, O. Reinforcement effect of inclined Prestressed concrete pipe piles on na inclined soft foundation, **Advances in Civil Engineering**, vol. 2020, p.(1-11), 2020.

APÊNDICE A – Quadro de recalques do Edifício A

(Continua)

DATA	Medição	RECALQUE (mm)																		TEMPO (dias)	
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18		MÉDIO
29/09/2003	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
20/10/2003	2	0,30	0,70	0,30	0,30	-0,10	0,10	0,00	0,70	-0,10	0,10	0,10	-0,60	0,00	1,30	0,90	1,30	1,00	1,40	0,43	21
11/11/2003	3	-0,05	0,15	0,35	0,55	0,30	0,45	0,10	-0,40	-0,10	0,20	0,10	-0,35	0,05	1,80	1,70	2,35	1,75	2,70	0,65	43
20/01/2004	4	1,35	1,60	1,60	1,75	1,45	1,75	1,45	0,40	0,65	1,65	1,60	0,50	1,30	2,60	2,05	2,90	2,25	3,25	1,67	113
19/03/2004	5	1,55	2,45	2,45	2,90	2,55	2,70	2,20	1,00	1,70	2,80	2,85	1,25	2,15	3,85	3,40	4,00	3,70	4,25	2,65	172
17/05/2004	6	1,70	3,35	3,60	4,55	2,30	2,60	2,80	-0,10	1,40	2,85	2,70	1,00	1,85	4,65	3,50	5,00	3,50	4,85	2,89	231
15/07/2004	7	1,75	3,10	3,95	5,05	3,00	3,95	3,60	2,15	2,90	4,00	3,75	2,35	3,20	5,25	5,50	5,70	5,35	5,50	3,89	290
09/08/2004	8	1,55	3,50	3,95	5,30	2,70	3,35	3,55	0,70	1,60	3,85	4,05	1,50	3,30	6,55	4,55	7,45	5,30	8,00	3,93	315
24/08/2004	9	2,30	4,15	4,80	5,85	3,45	4,15	4,15	1,55	2,45	4,85	5,10	2,35	4,30	7,55	6,25	7,90	7,35	9,25	4,88	330
21/09/2004	10	2,20	4,55	4,65	5,95	3,25	4,10	4,30	1,05	2,00	5,30	5,60	1,70	4,15	8,20	6,00	9,20	7,35	10,30	4,99	358
18/10/2004	11	3,25	5,55	6,20	7,75	5,55	6,45	6,40	3,02	4,20	8,05	8,90	3,90	6,95	11,15	9,20	12,20	10,10	12,75	7,31	385
04/11/2004	13	3,35	6,05	6,45	8,00	5,10	6,10	6,55	2,85	3,75	7,75	8,90	3,80	6,80	11,90	8,65	12,75	9,70	13,10	7,31	402
22/11/2004	14	3,75	6,05	6,85	8,25	5,30	6,30	6,65	2,95	3,85	8,00	9,15	3,85	6,95	12,00	9,35	12,95	10,15	13,35	7,54	420
10/12/2004	15	3,90	6,15	6,90	7,95	6,50	6,90	7,15	3,20	4,35	9,10	10,75	4,50	8,35	13,65	9,35	14,55	10,40	14,25	8,22	438
01/01/2005	16	5,05	7,30	8,10	9,50	7,90	8,50	8,85	5,10	6,20	10,90	12,30	6,10	10,45	14,70	11,35	15,00	11,70	15,25	9,68	460
16/02/2005	17	5,30	8,20	8,60	9,85	8,40	9,00	9,15	5,70	7,20	11,20	12,75	7,05	11,10	15,65	12,50	16,20	13,00	15,95	10,38	506
16/03/2005	18	6,70	9,95	10,55	11,80	10,15	10,65	11,00	7,45	8,45	13,30	15,10	8,50	12,75	16,95	12,50	17,15	13,10	16,40	11,80	534
04/04/2005	19	7,25	10,35	11,20	12,50	10,35	11,25	11,65	7,40	8,30	13,90	15,70	8,40	13,05	17,65	14,20	17,40	13,40	16,40	12,24	553
21/04/2005	20	7,80	11,10	12,15	14,15	11,20	12,05	12,70	7,75	8,70	14,85	16,30	8,25	12,90	18,45	14,00	18,50	13,45	16,40	12,82	570
13/05/2005	21	7,50	10,90	11,90	13,70	10,50	11,55	12,10	7,00	8,00	14,35	15,90	7,85	12,80	18,75	14,15	18,20	13,45	16,15	12,49	592
13/06/2005	22	8,15	12,20	13,45	15,15	12,05	12,40	13,35	8,40	9,80	14,95	16,50	7,55	13,25	20,20	15,80	19,25	13,45	16,15	13,45	623
14/07/2005	23	8,80	12,60	13,60	15,50	12,10	13,20	13,80	8,55	9,55	15,70	17,45	9,40	14,35	20,25	15,35	19,35	13,65	16,75	13,89	654
12/08/2005	24	9,65	13,30	14,65	16,45	13,25	14,30	14,75	9,25	10,60	16,70	18,25	9,75	15,05	21,10	16,15	20,10	14,55	17,55	14,74	683
14/09/2005	25	10,55	13,80	14,85	17,15	13,27	14,50	15,05	9,75	10,30	16,90	18,60	10,15	15,15	20,55	15,40	20,05	14,15	17,25	14,86	716
14/10/2005	26	9,85	13,75	14,80	16,65	13,55	14,35	14,90	9,70	10,85	16,60	18,55	10,00	14,85	21,45	16,20	20,35	14,95	18,05	14,97	746
17/11/2005	27	11,20	14,40	16,20	18,00	14,80	15,70	16,40	11,25	11,60	18,05	20,00	11,15	16,30	21,80	17,30	21,45	15,90	18,40	16,11	780
17/12/2005	28	11,55	14,75	16,40	18,00	15,17	16,25	16,50	11,60	12,10	18,35	20,10	11,80	16,75	22,10	17,10	21,60	15,95	19,00	16,39	810
17/01/2006	29	12,25	15,40	17,15	19,05	15,72	16,45	17,10	11,70	12,40	18,50	20,05	11,80	16,70	22,25	17,65	22,20	16,60	19,00	16,78	841

(Continua)

DATA	Medição	RECALQUE (mm)																		TEMPO (dias)	
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18		MÉDIO
16/02/2006	30	12,85	16,05	18,00	19,70	16,42	17,10	18,05	12,30	13,95	19,40	21,30	12,10	17,65	23,90	19,35	23,85	18,75	19,90	17,81	871
22/03/2006	31	13,20	17,05	18,20	20,20	16,40	17,85	18,30	12,65	13,50	19,60	21,60	12,20	17,60	23,25	18,70	23,95	17,55	19,95	17,88	905
24/04/2006	32	13,95	17,80	19,00	20,85	16,60	18,15	19,00	12,90	13,45	20,00	22,20	12,60	18,40	23,75	18,65	23,55	17,55	20,15	18,25	938
23/05/2006	33	13,65	17,30	18,55	20,15	16,50	18,45	18,95	12,95	13,15	19,90	22,00	12,50	18,15	23,45	18,40	23,30	17,30	19,80	18,03	967
20/07/2006	34	14,15	18,30	19,60	21,35	17,65	18,85	19,40	13,35	14,10	20,20	22,30	13,35	18,40	24,25	19,55	24,15	18,25	20,75	18,78	1025
22/09/2006	35	14,35	17,95	19,25	21,05	17,55	18,70	19,20	13,65	14,35	20,15	22,45	13,40	18,55	24,50	19,35	24,30	18,25	21,10	18,78	1089
27/11/2006	36	15,00	18,75	19,80	21,60	18,00	19,40	19,90	14,60	14,65	20,80	23,05	14,25	19,30	24,45	19,30	24,70	18,55	21,30	19,30	1155
23/01/2007	37	16,20	20,35	22,10	23,90	19,15	20,25	20,95	15,55	16,40	21,90	23,40	13,40	19,60	26,45	22,20	26,05	20,65	22,45	20,61	1212
10/04/2007	38	16,25	19,95	21,09	22,84	19,32	20,47	20,96	15,88	15,37	21,78	23,94	15,07	20,11	25,29	20,19	25,28	19,25	22,19	20,29	1289
28/06/2007	39	16,34	20,50	21,90	23,67	19,58	20,65	21,63	15,72	15,77	21,84	24,06	15,05	20,45	25,81	20,72	25,55	19,85	22,67	20,65	1368
27/08/2007	40	16,69	20,41	22,23	23,80	19,52	20,77	21,78	15,51	16,32	22,38	24,31	14,64	20,24	25,68	21,29	25,98	19,85	22,79	20,79	1428
13/11/2007	41	17,50	20,91	22,66	24,28	20,08	21,34	21,99	16,44	16,43	22,33	24,35	15,59	20,87	26,07	20,91	26,01	20,06	23,34	21,18	1506
07/01/2008	42	17,83	21,60	22,86	24,64	20,74	21,84	22,41	17,16	16,84	22,78	24,94	16,30	21,27	26,03	21,20	26,94	20,47	23,51	21,63	1561
13/03/2008	43	18,01	21,85	22,79	24,65	20,86	22,00	22,69	17,30	16,75	22,92	25,06	16,26	21,42	26,33	21,51	26,50	20,87	23,57	21,74	1627
15/05/2008	44	18,05	22,16	22,77	24,67	21,08	22,18	22,91	17,26	16,84	23,18	25,22	16,55	21,62	26,08	21,13	25,95	20,61	23,50	21,76	1690
22/07/2008	45	17,63	21,57	23,92	25,82	20,80	21,90	23,11	16,90	17,06	22,95	25,57	14,76	21,02	27,31	22,32	26,13	20,13	23,85	21,82	1758
01/10/2008	46	19,42	22,87	24,1	25,97	21,71	22,88	24	17,93	17,38	23,82	26,27	17,13	22,35	26,83	21,83	26,75	21,71	23,96	22,61	1829
27/11/2008	47	20,27	22,66	25,32	27,09	21,5	22,6	24,73	17,81	17,54	23,59	25,95	16,3	21,99	27,36	21,81	26,58	21,25	23,81	22,68	1886
27/01/2009	48	19,9	23,75	24,45	26,23	22,78	23,88	24,05	19,26	18,55	24,19	26,36	17,73	22,83	27,69	22,47	27,76	22,24	24,99	23,28	1947
13/04/2009	49	19,86	23,58	24,66	26,34	22,29	23,67	24,44	18,55	17,79	23,97	26,69	17,5	22,6	27,22	23,09	26,74	21,47	24,19	23,04	2023
02/07/2009	50	19,66	23,08	24,42	26,16	22,2	23,32	24,26	18,17	17,71	23,51	26,09	16,8	22,17	27,1	22,05	26,74	21,32	24,28	22,72	2103
07/01/2010	51	20,76	23,79	25,44	27,53	22,42	23,72	24,8	18,53	17,87	24,05	26,43	17,14	22,7	27,6	22,05	27,01	21,44	24,36	23,20	2292
09/07/2010	52	20,41	23,7	26,11	28,21	22,76	23,98	24,96	18,94	18,31	24,02	26,79	16,22	21,87	28,61	23	27,27	22,07	24,43	23,43	2475
19/01/2011	53	21,71	25,04	26,56	28,65	23,5	24,81	25,97	19,84	19,11	24,88	27,53	17,56	23,46	28,8	23,37	28,15	22,88	25,11	24,27	2669
01/08/2011	54	22,16	25,38	26,7	28,95	23,93	25,11	26,64	19,87	19,18	25,22	27,81	17,82	23,54	29,12	23,15	27,72	22,66	25,23	24,46	2863
12/01/2012	55	22,12	25,3	27	29,28	24,57	25,04	26,44	20,34	19,89	24,81	27,73	17,43	23,13	29,8	23,75	28,17	23,33	26,02	24,68	3027
26/06/2012	56	22,77	26,37	27,75	29,73	25,13	26,44	27,34	21,03	20,29	26,05	28,08	18,46	23,89	29,58	24,21	27,78	24,31	25,79	25,28	3193
09/01/2013	57	23,59	27,89	28,92	31,01	25,83	27,02	28,17	21,81	20,92	26,93	28,82	19,35	24,6	29,96	24,28	28,41	23,62	26,28	25,97	3390
15/07/2013	58	23,83	27,64	29,12	31,59	26,05	27,39	28,28	21,92	20,82	26,7	29,06	19,02	24,82	30,24	24,55	29,34	23,95	26,46	26,15	3577
14/01/2014	59	24,07	28,04	29,2	31,48	26,02	27,24	28,19	21,57	20,76	26,42	28,68	18,71	24,13	30,32	24,63	28,97	23,61	26,4	26,02	3760

(Conclusão)

DATA	Medição	RECALQUE (mm)																		TEMPO (dias)	
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18		MÉDIO
10/07/2014	60	25,25	28,54	30,59	32,77	26,19	27,54	28,86	21,64	20,61	26,57	29,01	18,9	24,89	29,94	24,33	28,79	23,75	26,45	26,37	3937
24/02/2015	61	25,12	29,45	30,44	32,85	26,94	28,36	29,62	22,89	21,57	27,41	29,74	20,01	25,4	30,61	24,95	29,6	24,38	27,25	27,03	4166
20/08/2015	62	25,78	29,69	31,33	33,52	27,53	28,73	29,84	22,9	21,71	27,69	29,9	20,12	25,56	30,94	25,08	29,79	24,58	27,5	27,34	4343
23/02/2016	63	25,81	30	31,33	33,69	27,93	29,03	30,16	23,35	22,18	27,82	30,29	20,37	25,84	31,64	25,88	30,43	25,05	28,08	27,72	4530
20/09/2016	64	27,85	30,53	32,94	35,3	28,67	29,96	31,46	24,04	22,7	28,86	31,26	21,08	26,45	31,92	26,14	30,68	25,42	28,42	28,54	4740
07/04/2017	65	26,76	31,06	32,62	35,06	28,88	30,16	31,19	24,23	23,09	28,9	31,11	21,15	26,73	32,6	26,76	31,45	26,1	29,19	28,72	4939
05/10/2018	66	27,54	30,56	32,74	35,1	30,07	30,81	31,2	24,57	23,49	29,22	31,84	21,53	26,9	32,14	26,45	31	26,02	29,76	28,94	5485
09/08/2019	67	28,54	30,69	34,9	37,43	30,65	32,17	32,92	25,71	24,24	30,22	32,5	22,21	27,46	33,97	27,79	32,25	27,43	30,68	30,10	5793
09/11/2020	68	28,64	30,83	34,94	37,14	30,97	32,35	33,14	26,05	24,58	30,08	32,38	22,8	27,99	33,85	27,54	32,18	26,97	30,24	30,15	6251

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE B - Quadro de velocidades de recalques do Edifício A

(Continua)

DATA	Medição	VELOCIDADE DE RECALQUE (micra/dia)																		
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	MÉDIO
29/09/2003	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20/10/2003	2	14,29	33,33	14,29	14,29	-4,76	4,76	0,00	33,33	-4,76	4,76	4,76	-28,57	0,00	61,90	42,86	61,90	47,62	66,67	20,37
11/11/2003	3	-15,91	-25,00	2,27	11,36	18,18	15,91	4,55	-50,00	0,00	4,55	0,00	11,36	2,27	22,73	36,36	47,73	34,09	59,09	9,97
20/01/2004	4	20,00	20,71	17,86	17,14	16,43	18,57	19,29	11,43	10,71	20,71	21,43	12,14	17,86	11,43	5,00	7,86	7,14	7,86	14,64
19/03/2004	5	3,39	14,41	14,41	19,49	18,64	16,10	12,71	10,17	17,80	19,49	21,19	12,71	14,41	21,19	22,88	18,64	24,58	16,95	16,62
17/05/2004	6	2,54	15,25	19,49	27,97	-4,24	-1,69	10,17	-18,64	-5,08	0,85	-2,54	-4,24	-5,08	13,56	1,69	16,95	-3,39	10,17	4,10
15/07/2004	7	0,85	-4,24	5,93	8,47	11,86	22,88	13,56	38,14	25,42	19,49	17,80	22,88	22,88	10,17	33,90	11,86	31,36	11,02	16,90
09/08/2004	8	-8,00	16,00	0,00	10,00	-12,00	-24,00	-2,00	-58,00	-52,00	-6,00	12,00	-34,00	4,00	52,00	-38,00	70,00	-2,00	100,00	1,56
24/08/2004	9	50,00	43,33	56,67	36,67	50,00	53,33	40,00	56,67	56,67	66,67	70,00	56,67	66,67	66,67	113,33	30,00	136,67	83,33	62,96
21/09/2004	10	-3,57	14,29	-5,36	3,57	-7,14	-1,79	5,36	-17,86	-16,07	16,07	17,86	-23,21	-5,36	23,21	-8,93	46,43	0,00	37,50	4,17
18/10/2004	11	38,89	37,04	57,41	66,67	85,19	87,04	77,78	72,96	81,48	101,85	122,22	81,48	103,70	109,26	118,52	111,11	101,85	90,74	85,84
04/11/2004	13	5,88	29,41	14,71	14,71	-26,47	-20,59	8,82	-10,00	-26,47	-17,65	0,00	-5,88	-8,82	44,12	-32,35	32,35	-23,53	20,59	-0,07
22/11/2004	14	22,22	0,00	22,22	13,89	11,11	11,11	5,56	5,56	5,56	13,89	13,89	2,78	8,33	5,56	38,89	11,11	25,00	13,89	12,81
10/12/2004	15	8,33	5,56	2,78	-16,67	66,67	33,33	27,78	13,89	27,78	61,11	88,89	36,11	77,78	91,67	0,00	88,89	13,89	50,00	37,65
01/01/2005	16	52,27	52,27	54,55	70,45	63,64	72,73	77,27	86,36	84,09	81,82	70,45	72,73	95,45	47,73	90,91	20,45	59,09	45,45	66,54
16/02/2005	17	5,43	19,57	10,87	7,61	10,87	10,87	6,52	13,04	21,74	6,52	9,78	20,65	14,13	20,65	25,00	26,09	28,26	15,22	15,16
16/03/2005	18	50,00	62,50	69,64	69,64	62,50	58,93	66,07	62,50	44,64	75,00	83,93	51,79	58,93	46,43	0,00	33,93	3,57	16,07	50,89
04/04/2005	19	28,95	21,05	34,21	36,84	10,53	31,58	34,21	-2,63	-7,89	31,58	31,58	-5,26	15,79	36,84	89,47	13,16	15,79	0,00	23,10
21/04/2005	20	32,35	44,12	55,88	97,06	50,00	47,06	61,76	20,59	23,53	55,88	35,29	-8,82	-8,82	47,06	-11,76	64,71	2,94	0,00	33,82
13/05/2005	21	-13,64	-9,09	-11,36	-20,45	-31,82	-22,73	-27,27	-34,09	-31,82	-22,73	-18,18	-18,18	-4,55	13,64	6,82	-13,64	0,00	-11,36	-15,03
13/06/2005	22	20,97	41,94	50,00	46,77	50,00	27,42	40,32	45,16	58,06	19,35	19,35	-9,68	14,52	46,77	53,23	33,87	0,00	0,00	31,00
14/07/2005	23	20,97	12,90	4,84	11,29	1,61	25,81	14,52	4,84	-8,06	24,19	30,65	59,68	35,48	1,61	-14,52	3,23	6,45	19,35	14,16
12/08/2005	24	29,31	24,14	36,21	32,76	39,66	37,93	32,76	24,14	36,21	34,48	27,59	12,07	24,14	29,31	27,59	25,86	31,03	27,59	29,60
14/09/2005	25	27,27	15,15	6,06	21,21	0,61	6,06	9,09	15,15	-9,09	6,06	10,61	12,12	3,03	-16,67	-22,73	-1,52	-12,12	-9,09	3,40
14/10/2005	26	-23,33	-1,67	-1,67	-16,67	9,33	-5,00	-5,00	-1,67	18,33	-10,00	-1,67	-5,00	-10,00	30,00	26,67	10,00	26,67	26,67	3,67
17/11/2005	27	39,71	19,12	41,18	39,71	36,76	39,71	44,12	45,59	22,06	42,65	42,65	33,82	42,65	10,29	32,35	32,35	27,94	10,29	33,50
17/12/2005	28	11,67	11,67	6,67	0,00	12,33	18,33	3,33	11,67	16,67	10,00	3,33	21,67	15,00	10,00	-6,67	5,00	1,67	20,00	9,57
17/01/2006	29	22,58	20,97	24,19	33,87	17,74	6,45	19,35	3,23	9,68	4,84	-1,61	0,00	-1,61	4,84	17,74	19,35	20,97	0,00	12,37
16/02/2006	30	20,00	21,67	28,33	21,67	23,33	21,67	31,67	20,00	51,67	30,00	41,67	10,00	31,67	55,00	56,67	55,00	71,67	30,00	34,54

(Continua)

DATA	Medição	VELOCIDADE DE RECALQUE (micra/dia)																		
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	MÉDIO
22/03/2006	31	10,29	29,41	5,88	14,71	-0,59	22,06	7,35	10,29	-13,24	5,88	8,82	2,94	-1,47	-19,12	-19,12	2,94	-35,29	1,47	1,85
24/04/2006	32	22,73	22,73	24,24	19,70	6,06	9,09	21,21	7,58	-1,52	12,12	18,18	12,12	24,24	15,15	-1,52	-12,12	0,00	6,06	11,45
23/05/2006	33	-10,34	-17,24	-15,52	-24,14	-3,45	10,34	-1,72	1,72	-10,34	-3,45	-6,90	-3,45	-8,62	-10,34	-8,62	-8,62	-8,62	-12,07	-7,85
20/07/2006	34	8,62	17,24	18,10	20,69	19,83	6,90	7,76	6,90	16,38	5,17	5,17	14,66	4,31	13,79	19,83	14,66	16,38	16,38	12,93
22/09/2006	35	3,13	-5,47	-5,47	-4,69	-1,56	-2,34	-3,12	4,69	3,91	-0,78	2,34	0,78	2,34	3,91	-3,12	2,34	0,00	5,47	0,13
27/11/2006	36	9,85	12,12	8,33	8,33	6,82	10,61	10,61	14,39	4,55	9,85	9,09	12,88	11,36	-0,76	-0,76	6,06	4,55	3,03	7,83
23/01/2007	37	21,05	28,07	40,35	40,35	20,18	14,91	18,42	16,67	30,70	19,30	6,14	-14,91	5,26	35,09	50,88	23,68	36,84	20,18	22,95
10/04/2007	38	0,65	-5,19	-13,12	-13,77	2,21	2,86	0,13	4,29	-13,38	-1,56	7,01	21,69	6,62	-15,06	-26,10	-10,00	-18,18	-3,38	-4,13
28/06/2007	39	1,14	6,96	10,25	10,51	3,29	2,28	8,48	-2,03	5,06	0,76	1,52	-0,25	4,30	6,58	6,71	3,42	7,59	6,08	4,59
27/08/2007	40	5,83	-1,50	5,50	2,17	-1,00	2,00	2,50	-3,50	9,17	9,00	4,17	-6,83	-3,50	-2,17	9,50	7,17	0,00	2,00	2,25
13/11/2007	41	10,38	6,41	5,51	6,15	7,18	7,31	2,69	11,92	1,41	-0,64	0,51	12,18	8,08	5,00	-4,87	0,38	2,69	7,05	4,96
07/01/2008	42	6,00	12,55	3,64	6,55	12,00	9,09	7,64	13,09	7,45	8,18	10,73	12,91	7,27	-0,73	5,27	16,91	7,45	3,09	8,28
13/03/2008	43	2,73	3,79	-1,06	0,15	1,82	2,42	4,24	2,12	-1,36	2,12	1,82	-0,61	2,27	4,55	4,70	-6,67	6,06	0,91	1,67
15/05/2008	44	0,63	4,92	-0,32	0,32	3,49	2,86	3,49	-0,63	1,43	4,13	2,54	4,60	3,17	-3,97	-6,03	-8,73	-4,13	-1,11	0,37
22/07/2008	45	-6,18	-8,68	16,91	16,91	-4,12	-4,12	2,94	-5,29	3,24	-3,38	5,15	-26,32	-8,82	18,09	17,50	2,65	-7,06	5,15	0,81
01/10/2008	46	25,21	18,31	2,54	2,11	12,82	13,80	12,54	14,51	4,51	12,25	9,86	33,38	18,73	-6,76	-6,90	8,73	22,25	1,55	11,08
27/11/2008	47	14,91	-3,68	21,40	19,65	-3,68	-4,91	12,81	-2,11	2,81	-4,04	-5,61	-14,56	-6,32	9,30	-0,35	-2,98	-8,07	-2,63	1,22
27/01/2009	48	-6,07	17,87	-14,26	-14,10	20,98	20,98	-11,15	23,77	16,56	9,84	6,72	23,44	13,77	5,41	10,82	19,34	16,23	19,34	9,97
13/04/2009	49	-0,53	-2,24	2,76	1,45	-6,45	-2,76	5,13	-9,34	-10,00	-2,89	4,34	-3,03	-3,03	-6,18	8,16	-13,42	-10,13	-10,53	-3,26
02/07/2009	50	-2,50	-6,25	-3,00	-2,25	-1,13	-4,37	-2,25	-4,75	-1,00	-5,75	-7,50	-8,75	-5,38	-1,50	-13,00	0,00	-1,87	1,13	-3,90
07/01/2010	51	5,82	3,76	5,40	7,25	1,16	2,12	2,86	1,90	0,85	2,86	1,80	1,80	2,80	2,65	0,00	1,43	0,63	0,42	2,53
09/07/2010	52	-1,91	-0,49	3,66	3,72	1,86	1,42	0,87	2,24	2,40	-0,16	1,97	-5,03	-4,54	5,52	5,19	1,42	3,44	0,38	1,22
19/01/2011	53	6,70	6,91	2,32	2,27	3,81	4,28	5,21	4,64	4,12	4,43	3,81	6,91	8,20	0,98	1,91	4,54	4,18	3,51	4,37
01/08/2011	54	2,32	1,75	0,72	1,55	2,22	1,55	3,45	0,15	0,36	1,75	1,44	1,34	0,41	1,65	-1,13	-2,22	-1,13	0,62	0,93
12/01/2012	55	-0,24	-0,49	1,83	2,01	3,90	-0,43	-1,22	2,87	4,33	-2,50	-0,49	-2,38	-2,50	4,15	3,66	2,74	4,09	4,82	1,34
26/06/2012	56	3,92	6,45	4,52	2,71	3,37	8,43	5,42	4,16	2,41	7,47	2,11	6,20	4,58	-1,33	2,77	-2,35	5,90	-1,39	3,63
09/01/2013	57	4,16	7,72	5,94	6,50	3,55	2,94	4,21	3,96	3,20	4,47	3,76	4,52	3,60	1,93	0,36	3,20	-3,50	2,49	3,50
15/07/2013	58	1,28	-1,34	1,07	3,10	1,18	1,98	0,59	0,59	-0,53	-1,23	1,28	-1,76	1,18	1,50	1,44	4,97	1,76	0,96	1,00
14/01/2014	59	1,31	2,19	0,44	-0,60	-0,16	-0,82	-0,49	-1,91	-0,33	-1,53	-2,08	-1,69	-3,77	0,44	0,44	-2,02	-1,86	-0,33	-0,71
10/07/2014	60	6,67	2,82	7,85	7,29	0,96	1,69	3,79	0,40	-0,85	0,85	1,86	1,07	4,29	-2,15	-1,69	-1,02	0,79	0,28	1,94
24/02/2015	61	-0,57	3,97	-0,66	0,35	3,28	3,58	3,32	5,46	4,19	3,67	3,19	4,85	2,23	2,93	2,71	3,54	2,75	3,49	2,90

(Conclusão)

DATA	Medição	VELOCIDADE DE RECALQUE (micra/dia)																		
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	MÉDIO
20/08/2015	62	3,73	1,36	5,03	3,79	3,33	2,09	1,24	0,06	0,79	1,58	0,90	0,62	0,90	1,86	0,73	1,07	1,13	1,41	1,76
23/02/2016	63	0,16	1,66	0,00	0,91	2,14	1,60	1,71	2,41	2,51	0,70	2,09	1,34	1,50	3,74	4,28	3,42	2,51	3,10	1,99
20/09/2016	64	9,71	2,52	7,67	7,67	3,52	4,43	6,19	3,29	2,48	4,95	4,62	3,38	2,90	1,33	1,24	1,19	1,76	1,62	3,92
07/04/2017	65	-5,48	2,66	-1,61	-1,21	1,06	1,01	-1,36	0,95	1,96	0,20	-0,75	0,35	1,41	3,42	3,12	3,87	3,42	3,87	0,94
05/10/2018	66	1,43	-0,92	0,22	0,07	2,18	1,19	0,02	0,62	0,73	0,59	1,34	0,70	0,31	-0,84	-0,57	-0,82	-0,15	1,04	0,40
09/08/2019	67	3,25	0,42	7,01	7,56	1,88	4,42	5,58	3,70	2,44	3,25	2,14	2,21	1,82	5,94	4,35	4,06	4,58	2,99	3,76
09/11/2020	68	0,22	0,31	0,09	-0,63	0,70	0,39	0,48	0,74	0,74	-0,31	-0,26	1,29	1,16	-0,26	-0,55	-0,15	-1,00	-0,96	0,11

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE C - Quadro de velocidades de recalques do Edifício B

(Continua)

DATA	RECALQUE (mm)					TEMPO (dias)
	P314	P332	P305	P323	MÉDIO	
30/09/2011	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
01/10/2011	0,35	0,20	0,00	0,00	0,14	1
02/10/2011	0,25	0,25	0,00	0,00	0,13	2
03/10/2011	0,50	0,60	0,00	0,00	0,28	3
04/10/2011	1,25	0,90	0,00	0,00	0,54	4
05/10/2011	1,60	1,25	0,00	0,00	0,71	5
06/10/2011	2,30	2,20	0,00	0,00	1,13	6
07/10/2011	2,50	2,25	0,18	0,05	1,24	7
08/10/2011	2,70	2,60	0,25	0,70	1,56	8
09/10/2011	3,15	3,10	0,60	1,25	2,03	9
10/10/2011	3,00	2,90	0,80	1,26	1,99	10
11/10/2011	3,10	2,90	0,84	1,50	2,09	11
12/10/2011	2,75	2,75	0,85	1,75	2,03	12
13/10/2011	2,60	3,40	0,90	1,70	2,15	13
14/10/2011	3,80	3,60	1,00	1,75	2,54	14
15/10/2011	4,25	3,90	1,10	2,10	2,84	15
16/10/2011	4,50	4,00	1,60	2,05	3,04	16
17/10/2011	5,00	4,40	1,70	2,50	3,40	17
18/10/2011	5,40	4,50	2,00	2,00	3,48	18
19/10/2011	5,30	4,75	2,60	3,40	4,01	19
20/10/2011	5,20	5,00	2,65	3,50	4,09	20
21/10/2011	5,30	4,75	2,70	3,65	4,10	21
22/10/2011	5,75	5,05	3,20	3,20	4,30	22
23/10/2011	6,40	5,10	3,60	4,20	4,83	23

(Continua)

DATA	RECALQUE (mm)					TEMPO (dias)
	P314	P332	P305	P323	MÉDIO	
24/10/2011	6,80	5,30	3,70	3,90	4,93	24
25/10/2011	7,20	5,40	3,70	4,00	5,08	25
26/10/2011	7,40	5,45	4,25	3,90	5,25	26
27/10/2011	7,75	5,45	4,70	3,95	5,46	27
28/10/2011	7,90	5,30	5,20	4,10	5,63	28
29/10/2011	7,90	5,10	6,00	5,50	6,13	29
30/10/2011	7,90	5,40	5,90	5,65	6,21	30
31/10/2011	7,90	5,25	6,10	6,50	6,44	31
01/11/2011	7,90	6,80	6,50	6,50	6,93	32
02/11/2011	7,80	6,90	7,30	8,50	7,63	33
03/11/2011	8,10	7,40	7,60	7,60	7,68	34
04/11/2011	8,1	7,30	7,70	7,90	7,75	35
05/11/2011	8,1	7,20	8,50	8,40	8,05	36
06/11/2011	8,6	7,10	9,40	8,50	8,40	37
07/11/2011	8,90	7,40	10,00	8,51	8,70	38
08/11/2011	8,80	7,25	11,00	8,75	8,95	39
09/11/2011	8,95	7,10	12,00	8,70	9,19	40
10/11/2011	9,50	7,15	12,80	9,10	9,64	41
11/11/2011	9,75	7,30	13,00	9,40	9,86	42
12/11/2011	9,70	7,25	14,50	9,50	10,24	43
13/11/2011	9,6	7,6	14,8	10,25	10,56	44
14/11/2011	10,25	7,9	14,6	10,25	10,75	45
15/11/2011	10,1	7,75	14,6	10,25	10,68	46
16/11/2011	9,8	7,65	14,75	10,2	10,60	47

(Continua)

DATA	RECALQUE (mm)					TEMPO (dias)
	P314	P332	P305	P323	MÉDIO	
17/11/2011	9,75	7,6	14,8	10,5	10,66	48
18/11/2011	10	8	14,9	10,4	10,83	49
19/11/2011	10,25	8,2	14,8	10,7	10,99	50
20/11/2011	10,1	8,4	14,95	11	11,11	51
21/11/2011	10,5	8,5	15	11,5	11,38	52
22/11/2011	10,75	8,7	15,25	11,2	11,48	53
23/11/2011	10,76	8,8	15,75	11,25	11,64	54
24/11/2011	11,4	9	15,6	12,2	12,05	55
25/11/2011	11,4	9,5	15,7	12,3	12,23	56
26/11/2011	11,3	9,6	15,6	12	12,13	57
27/11/2011	11,2	9,65	15,5	12,2	12,14	58
28/11/2011	11,1	9,7	15,35	12,3	12,11	59
29/11/2011	10,7	9,7	15,4	12	11,95	60
30/11/2011	10,9	9,95	15,6	12,2	12,16	61
01/12/2011	11,1	9,8	15,7	12,5	12,28	62
02/12/2011	11,3	9,8	15,6	12,2	12,23	63
03/12/2011	11,25	9,8	15,55	12,35	12,24	64
04/12/2011	11,2	9,8	15,5	12,5	12,25	65
05/12/2011	11,15	9,8	15,45	12,9	12,33	66
06/12/2011	11,1	9	15,43	13,4	12,23	67
07/12/2011	11,5	9,3	15,4	13,5	12,43	68
08/12/2011	12	9,5	15,6	13,5	12,65	69
09/12/2011	12,35	9,7	15,6	13,5	12,79	70
10/12/2011	12,45	9,9	15,63	13,4	12,85	71

(Conclusão)

DATA	RECALQUE (mm)					TEMPO (dias)
	P314	P332	P305	P323	MÉDIO	
11/12/2011	12,74	9,8	15,64	13,1	12,82	72
12/12/2011	12,8	10	15,65	13,5	12,99	73
13/12/2011	12,5	10,4	15,67	13,7	13,07	74
14/12/2011	12,1	10,1	16	13	12,80	75

Fonte: Adaptado de Souza (2013)

APÊNDICE D - Quadro de velocidades de recalques do Edifício B

(Continua)

DATA	VELOCIDADE DE RECALQUE (micra/dia)				
	P314	P332	P305	P323	MÉDIO
30/09/2011	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
01/10/2011	350,00	200,00	0,00	0,00	137,50
02/10/2011	-100,00	50,00	0,00	0,00	-12,50
03/10/2011	250,00	350,00	0,00	0,00	150,00
04/10/2011	750,00	300,00	0,00	0,00	262,50
05/10/2011	350,00	350,00	0,00	0,00	175,00
06/10/2011	700,00	950,00	0,00	0,00	412,50
07/10/2011	200,00	50,00	175,00	50,00	118,75
08/10/2011	200,00	350,00	75,00	650,00	318,75
09/10/2011	450,00	500,00	350,00	550,00	462,50
10/10/2011	-150,00	-200,00	200,00	10,00	-35,00
11/10/2011	100,00	0,00	40,00	240,00	95,00
12/10/2011	-350,00	-150,00	10,00	250,00	-60,00
13/10/2011	-150,00	650,00	50,00	-50,00	125,00
14/10/2011	1200,00	200,00	100,00	50,00	387,50
15/10/2011	450,00	300,00	100,00	350,00	300,00
16/10/2011	250,00	100,00	500,00	-50,00	200,00
17/10/2011	500,00	400,00	100,00	450,00	362,50
18/10/2011	400,00	100,00	300,00	-500,00	75,00
19/10/2011	-100,00	250,00	600,00	1400,00	537,50
20/10/2011	-100,00	250,00	50,00	100,00	75,00
21/10/2011	100,00	-250,00	50,00	150,00	12,50
22/10/2011	450,00	300,00	500,00	-450,00	200,00
23/10/2011	650,00	50,00	400,00	1000,00	525,00

(Continua)

DATA	VELOCIDADE DE RECALQUE (micra/dia)				
	P314	P332	P305	P323	MÉDIO
24/10/2011	400,00	200,00	100,00	-300,00	100,00
25/10/2011	400,00	100,00	0,00	100,00	150,00
26/10/2011	200,00	50,00	550,00	-100,00	175,00
27/10/2011	350,00	0,00	450,00	50,00	212,50
28/10/2011	150,00	-150,00	500,00	150,00	162,50
29/10/2011	0,00	-200,00	800,00	1400,00	500,00
30/10/2011	0,00	300,00	-100,00	150,00	87,50
31/10/2011	0,00	-150,00	200,00	850,00	225,00
01/11/2011	0,00	1550,00	400,00	0,00	487,50
02/11/2011	-100,00	100,00	800,00	2000,00	700,00
03/11/2011	300,00	500,00	300,00	-900,00	50,00
04/11/2011	0,00	-100,00	100,00	300,00	75,00
05/11/2011	0,00	-100,00	800,00	500,00	300,00
06/11/2011	500,00	-100,00	900,00	100,00	350,00
07/11/2011	300,00	300,00	600,00	10,00	302,50
08/11/2011	-100,00	-150,00	1000,00	240,00	247,50
09/11/2011	150,00	-150,00	1000,00	-50,00	237,50
10/11/2011	550,00	50,00	800,00	400,00	450,00
11/11/2011	250,00	150,00	200,00	300,00	225,00
12/11/2011	-50,00	-50,00	1500,00	100,00	375,00
13/11/2011	-100,00	350,00	300,00	750,00	325,00
14/11/2011	650,00	300,00	-200,00	0,00	187,50
15/11/2011	-150,00	-150,00	0,00	0,00	-75,00
16/11/2011	-300,00	-100,00	150,00	-50,00	-75,00

(Continua)

DATA	VELOCIDADE DE RECALQUE (micra/dia)				
	P314	P332	P305	P323	MÉDIO
17/11/2011	-50,00	-50,00	50,00	300,00	62,50
18/11/2011	250,00	400,00	100,00	-100,00	162,50
19/11/2011	250,00	200,00	-100,00	300,00	162,50
20/11/2011	-150,00	200,00	150,00	300,00	125,00
21/11/2011	400,00	100,00	50,00	500,00	262,50
22/11/2011	250,00	200,00	250,00	-300,00	100,00
23/11/2011	10,00	100,00	500,00	50,00	165,00
24/11/2011	640,00	200,00	-150,00	950,00	410,00
25/11/2011	0,00	500,00	100,00	100,00	175,00
26/11/2011	-100,00	100,00	-100,00	-300,00	-100,00
27/11/2011	-100,00	50,00	-100,00	200,00	12,50
28/11/2011	-100,00	50,00	-150,00	100,00	-25,00
29/11/2011	-400,00	0,00	50,00	-300,00	-162,50
30/11/2011	200,00	250,00	200,00	200,00	212,50
01/12/2011	200,00	-150,00	100,00	300,00	112,50
02/12/2011	200,00	0,00	-100,00	-300,00	-50,00
03/12/2011	-50,00	0,00	-50,00	150,00	12,50
04/12/2011	-50,00	0,00	-50,00	150,00	12,50
05/12/2011	-50,00	0,00	-50,00	400,00	75,00
06/12/2011	-50,00	-800,00	-20,00	500,00	-92,50
07/12/2011	400,00	300,00	-30,00	100,00	192,50
08/12/2011	500,00	200,00	200,00	0,00	225,00
09/12/2011	350,00	200,00	0,00	0,00	137,50
10/12/2011	100,00	200,00	30,00	-100,00	57,50
11/12/2011	290,00	-100,00	10,00	-300,00	-25,00

(Conclusão)

DATA	VELOCIDADE DE RECALQUE (micra/dia)				
	P314	P332	P305	P323	MÉDIO
12/12/2011	60,00	200,00	10,00	400,00	167,50
13/12/2011	-300,00	400,00	20,00	200,00	80,00
14/12/2011	-400,00	-300,00	330,00	-700,00	-267,50

Fonte: Adaptado de Souza (2013)

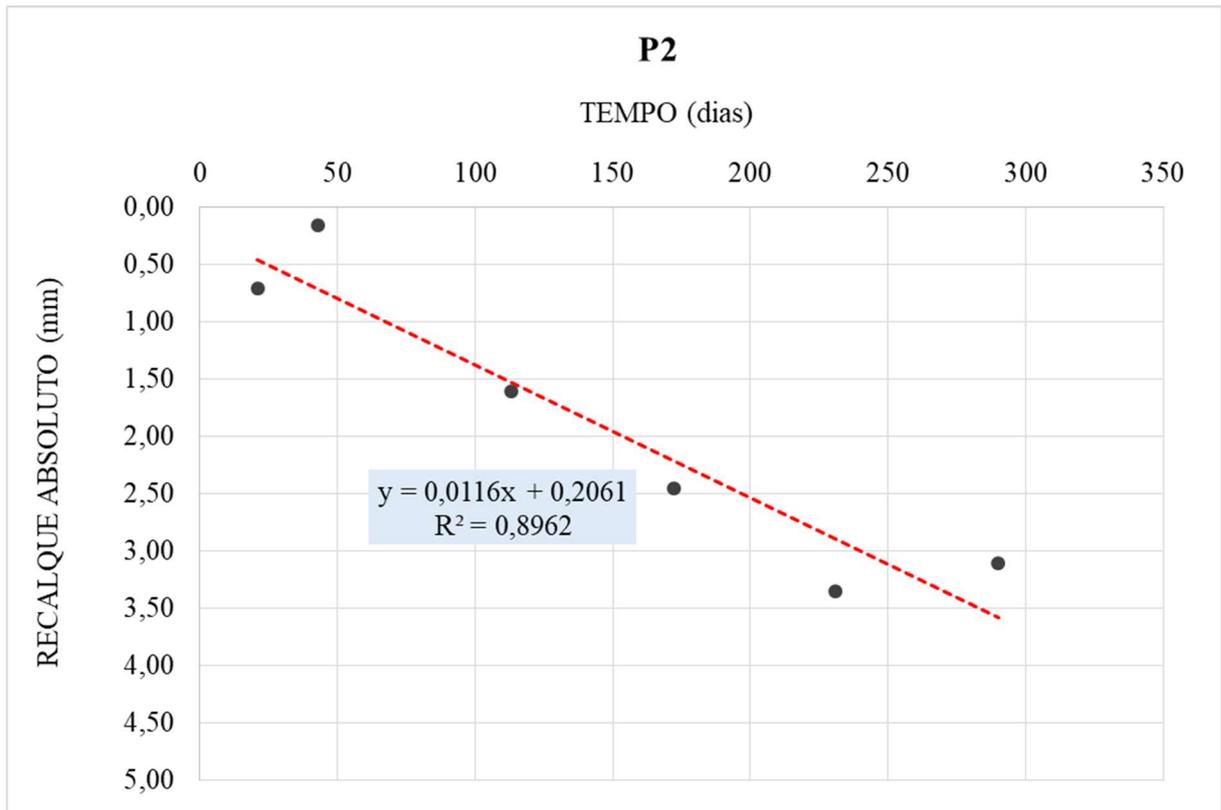
APÊNDICE E – Resultados de aplicação do modelo para os pilares P2, P11, P18, P314, P332, P323, média dos pilares (P1 a P18) e média dos pilares (P314, P332, P305 e P323)

1. Resultados de aplicação do modelo para os pilares P2

a. Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do P2 nas medições L2 a L7, exceto L12, e o tempo acumulado em dias foi gerado o gráfico da Figura 5.

Figura 65 – Tempo x recalque do trecho A para o P2



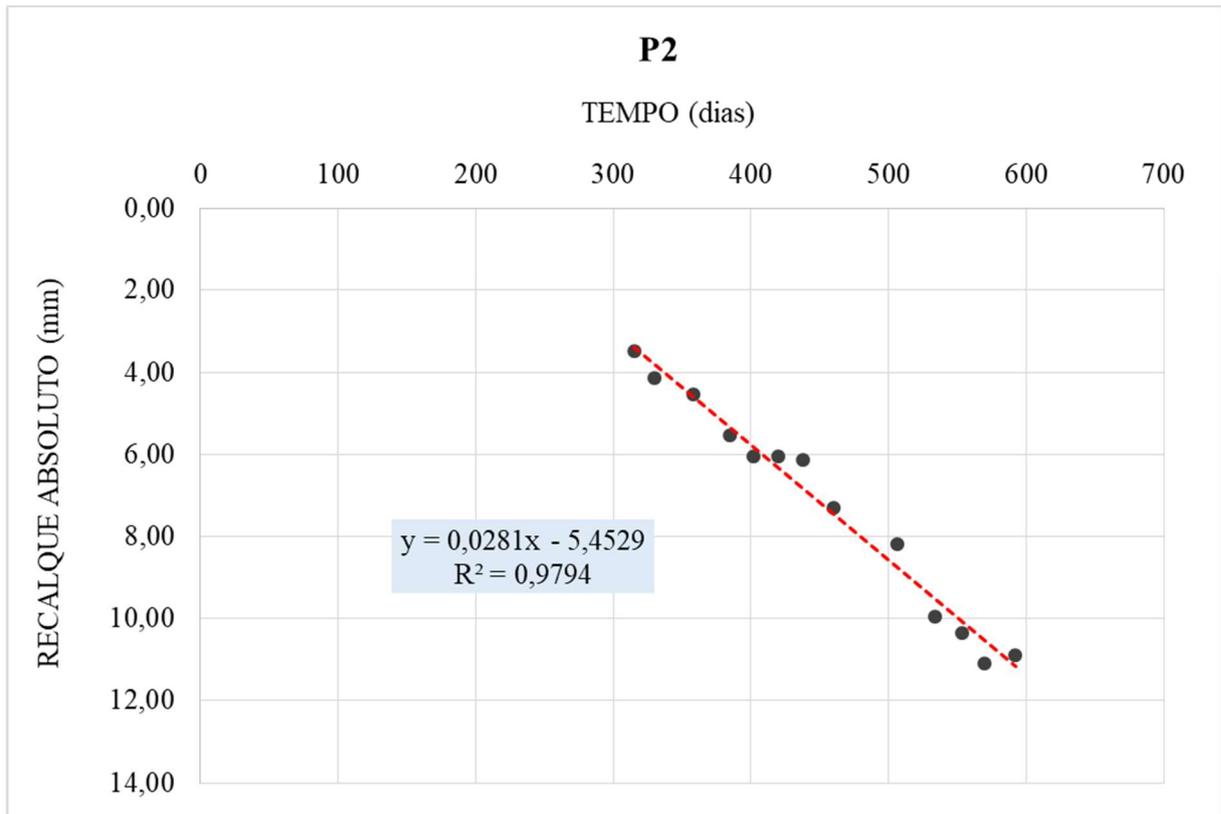
Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_a é de 11,625 micra/dia, correspondente à velocidade histórica de recalque, antes de qualquer intervenção na obra.

b. Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do P2 nas medições L8 a L21 e o tempo acumulado em dias foi gerado o gráfico da Figura 66.

Figura 66 – Tempo x recalque do trecho B para o P2



Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_b é de 28,089 micra/dia, correspondente à velocidade após o início da cravação das estacas até o momento antes do início incorporação das estacas aos blocos. O valor do fator μ foi de 2,42 e percebe-se um aumento aproximado de 240% do valor da V_a .

c. Trecho C: Início da incorporação até L63

Com base nos valores de recalque do P2 nas medições L22 a L63 e o tempo acumulado em dias foram encontrados os valores de $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right]$ e Δt , apresentados na Tabela 10 e gerado o gráfico da Figura 67.

Tabela 10 – Regressão linear do trecho C do P2

(Continua)

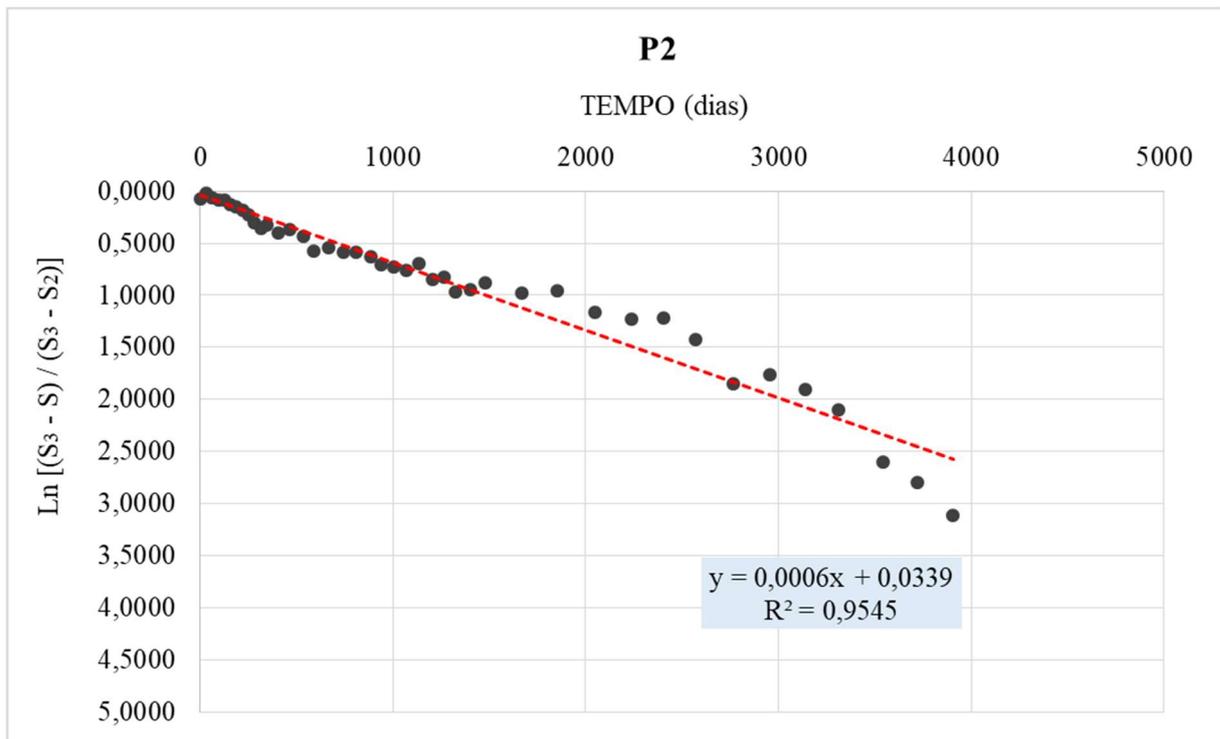
Leitura	Δt (dias)	$-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
22	0	0,0693
23	31	0,0217
24	60	0,0609
25	93	0,0898
26	123	0,0869
27	157	0,1257
28	187	0,1472
29	218	0,1885
30	248	0,2315
31	282	0,3016
32	315	0,3575
33	344	0,3199
34	402	0,3966
35	466	0,3691
36	532	0,4332
37	589	0,5753
38	666	0,5378
39	745	0,5897
40	805	0,5810
41	883	0,6302
42	938	0,7023
43	1004	0,7298
44	1067	0,7649
45	1135	0,6991
46	1206	0,8503
47	1263	0,8243
48	1324	0,9675
49	1400	0,9438
50	1480	0,8771
51	1669	0,9732
52	1852	0,9605
53	2046	1,1686
54	2240	1,2292
55	2404	1,2146
56	2570	1,4296
57	2767	1,8464
58	2954	1,7648
59	3137	1,8987
60	3314	2,0962

(Conclusão)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
61	3543	2,6027
62	3720	2,7937
63	3907	3,1111

Fonte: Autora (2022)

Figura 67 – Tempo x $-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$



Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para λ é de $0,00064968 \text{ dias}^{-1}$.

Aplicando agora o modelo proposto por Gusmão (2006), com as datas das leituras, intervalo de tempo das medições e recalque absoluto e cada leitura, é formada a Tabela 11.

Tabela 11 -Valores para elaboração do gráfico do trecho C do P2

(Continua)

Leitura	Data	ΔT (dias)	S (mm)
L1	29/09/2003	0	0,00
L7	15/07/2004	290	3,37

(Conclusão)

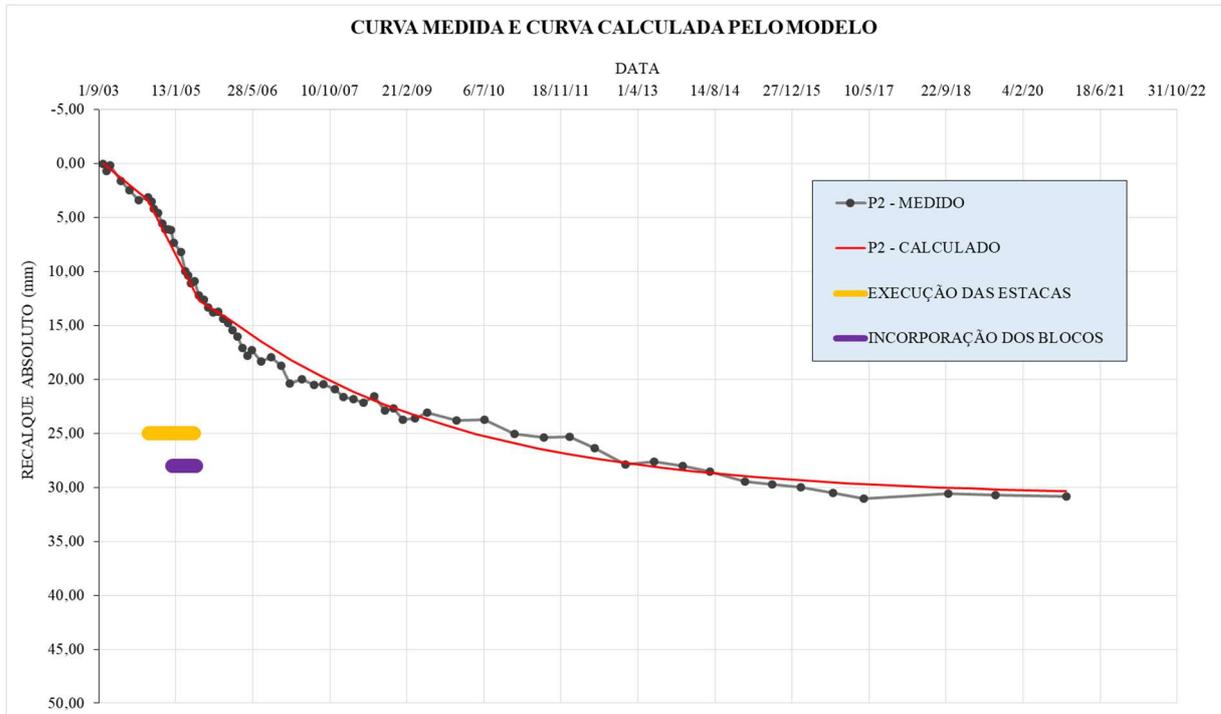
Leitura	Data	T (dias)	S (mm)
L22	13/06/2005	333	12,72
	30/12/2005	200	14,47
	18/07/2006	400	16,46
	03/02/2007	600	18,21
	22/08/2007	800	19,75
	09/03/2008	1000	21,10
	25/09/2008	1200	22,29
	13/04/2009	1400	23,33
	30/10/2009	1600	24,24
	18/05/2010	1800	25,04
	04/12/2010	2000	25,75
	22/06/2011	2200	26,37
	08/01/2012	2400	26,91
	26/07/2012	2600	27,39
	11/02/2013	2800	27,81
	30/08/2013	3000	28,18
	18/03/2014	3200	28,50
	04/10/2014	3400	28,78
	22/04/2015	3600	29,03
	08/11/2015	3800	29,25
	26/05/2016	4000	29,44
	12/12/2016	4200	29,61
	30/06/2017	4400	29,76
	16/01/2018	4600	29,89
	04/08/2018	4800	30,01
	20/02/2019	5000	30,11
	08/09/2019	5200	30,19
	26/03/2020	5400	30,27
	12/10/2020	5600	30,34
L68	09/11/2020	5628	30,35

Fonte: Autora (2022)

Os valores de L1 a L7 correspondem ao trecho A (momento antes do início do reforço na fundação); os valores de L7 a L22, o trecho B (durante a cravação de estacas); e a partir da L22 a L68, o trecho C (momento a partir da incorporação das estacas aos blocos até a última medição realizada).

Após definir os valores da tabela é possível elaborar o gráfico apresentado na Figura 68, com a curva formada pelo modelo proposto sobreposta aos valores medidos de recalque durante toda a obra.

Figura 68 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o P2



Fonte: Autora (2022)

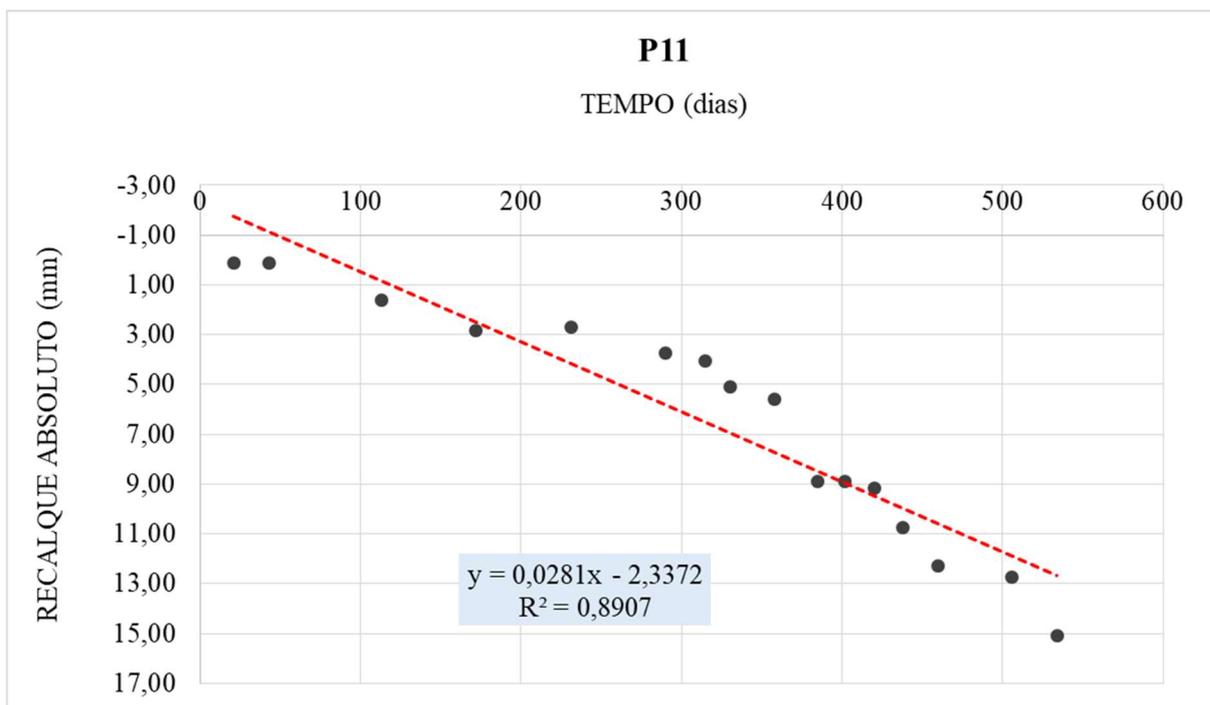
Observa-se que assim como os no pilar P1, no pilar P2 se comporta da mesma maneira com foi explicado para esse mesmo trecho.

2. Resultados de aplicação do modelo para os pilares P11

a. Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do P11 nas medições L2 a L18 e o tempo acumulado em dias, foi gerado o gráfico da Figura 69.

Figura 69 – Tempo x recalque do trecho A para o P11



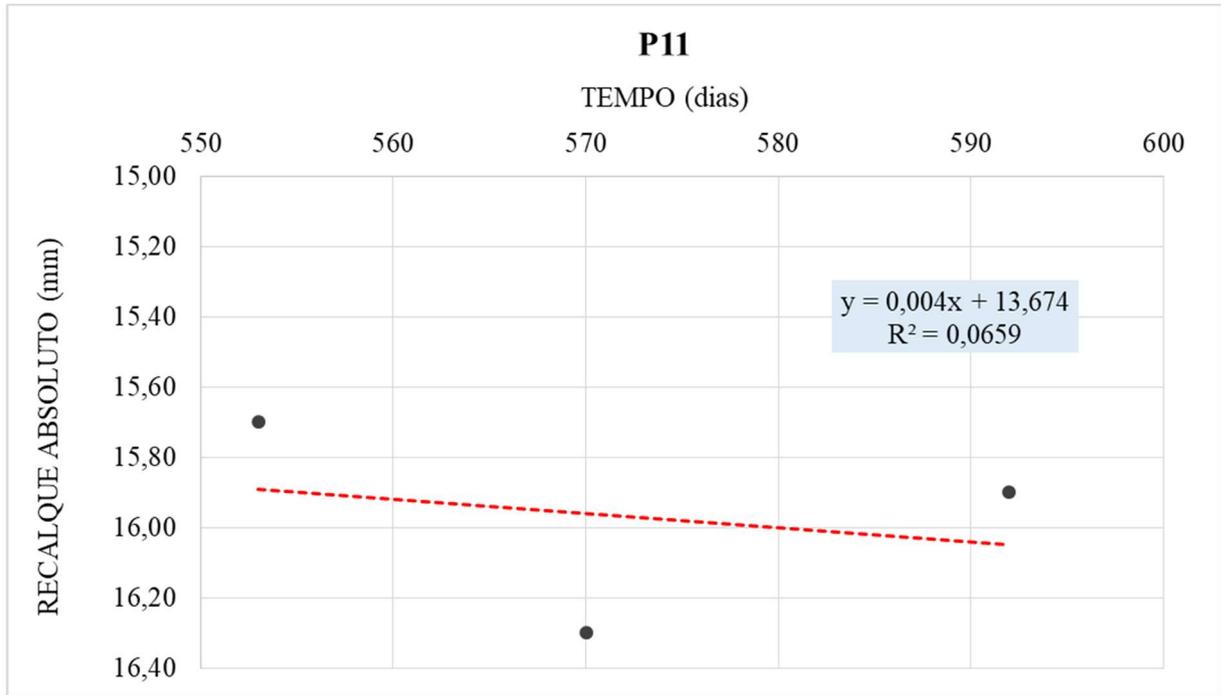
Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_a é de 28,118 micra/dia, correspondente à velocidade histórica de recalque, antes de qualquer intervenção na obra.

b. Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do P11 nas medições L19 a L21 e o tempo acumulado em dias, foi gerado o gráfico da Figura 70.

Figura 70 – Tempo x recalque do trecho B para o P11



Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_b é de -8,85 micra/dia, correspondente à velocidade após o início da cravação das estacas até o momento antes do início incorporação das estacas aos blocos. O valor do fator μ foi de -0,31 e percebe-se um movimento retrógrado nesse trecho.

c. Trecho C: Do começo da incorporação até L65

Com base nos valores de recalque do P11 nas medições L22 a L65 e o tempo acumulado em dias foram encontrados os valores de $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right]$ e Δt , apresentados na Tabela 12 e gerado o gráfico da Figura 71.

Tabela 12 – Regressão linear do trecho C do P11

(Continua)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
22	0	0,0000
23	31	0,0617
24	60	0,1168
25	93	0,1418

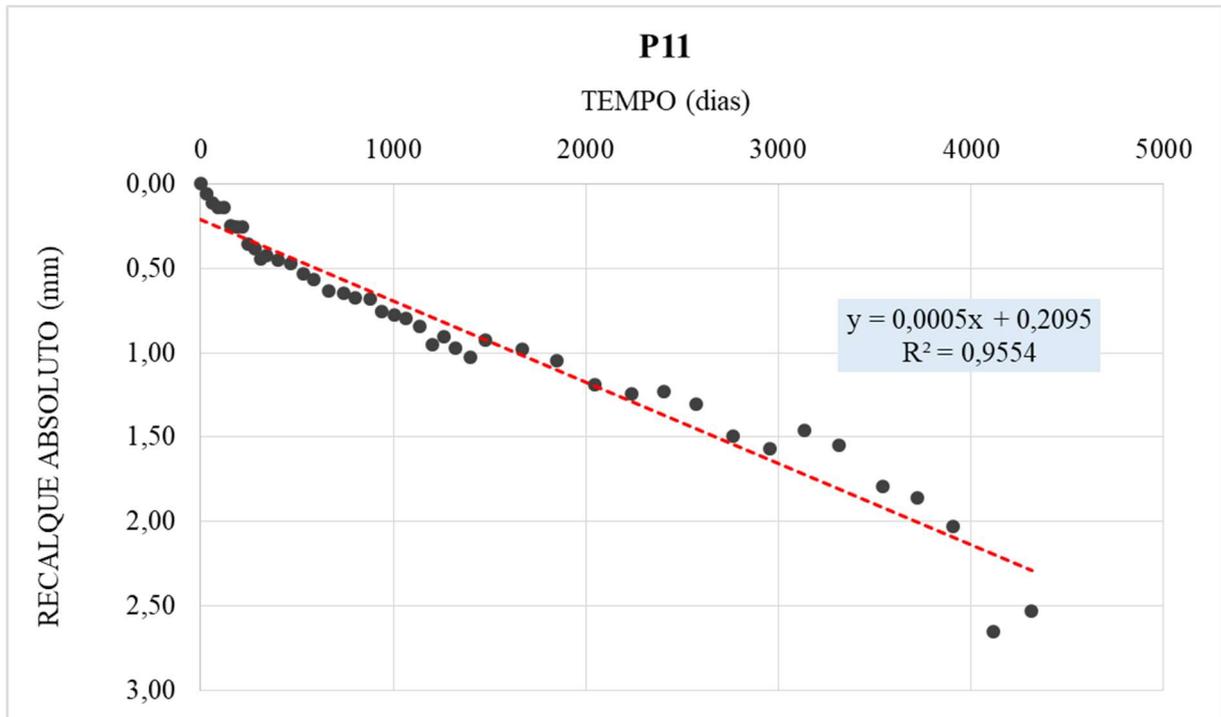
(Continua)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
26	123	0,1382
27	157	0,2490
28	187	0,2571
29	218	0,2530
30	248	0,3599
31	282	0,3874
32	315	0,4446
33	344	0,4252
34	402	0,4545
35	466	0,4695
36	532	0,5318
37	589	0,5701
38	666	0,6321
39	745	0,6464
40	805	0,6769
41	883	0,6819
42	938	0,7582
43	1004	0,7745
44	1067	0,7966
45	1135	0,8467
46	1206	0,9551
47	1263	0,9041
48	1324	0,9700
49	1400	1,0264
50	1480	0,9261
51	1669	0,9817
52	1852	1,0441
53	2046	1,1861
54	2240	1,2455
55	2404	1,2282
56	2570	1,3064
57	2767	1,4953
58	2954	1,5651
59	3137	1,4567
60	3314	1,5501
61	3543	1,7943
62	3720	1,8568
63	3907	2,0279
64	4117	2,6517

(Conclusão)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln(S_3 - S)/(S_3 - S_2)$
65	4316	2,5260

Fonte: Autora (2022)

Figura 71 – Tempo x $-\ln(S_3 - S)/(S_3 - S_2)$ 

Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para λ é de $0,00048228 \text{ dias}^{-1}$.

Aplicando agora o modelo proposto por Gusmão (2006), com as datas das leituras, intervalo de tempo das medições e recalque absoluto e cada leitura, é formada a Tabela 13.

Tabela 13 -Valores para elaboração do gráfico do trecho C do P11

(Continua)

Leitura	Data	T (dias)	S (mm)
L1	29/09/2003	0	0,00
L18	16/03/2005	534	15,01
L21	13/05/2005	58	14,50
	29/11/2005	200	17,96

(Conclusão)

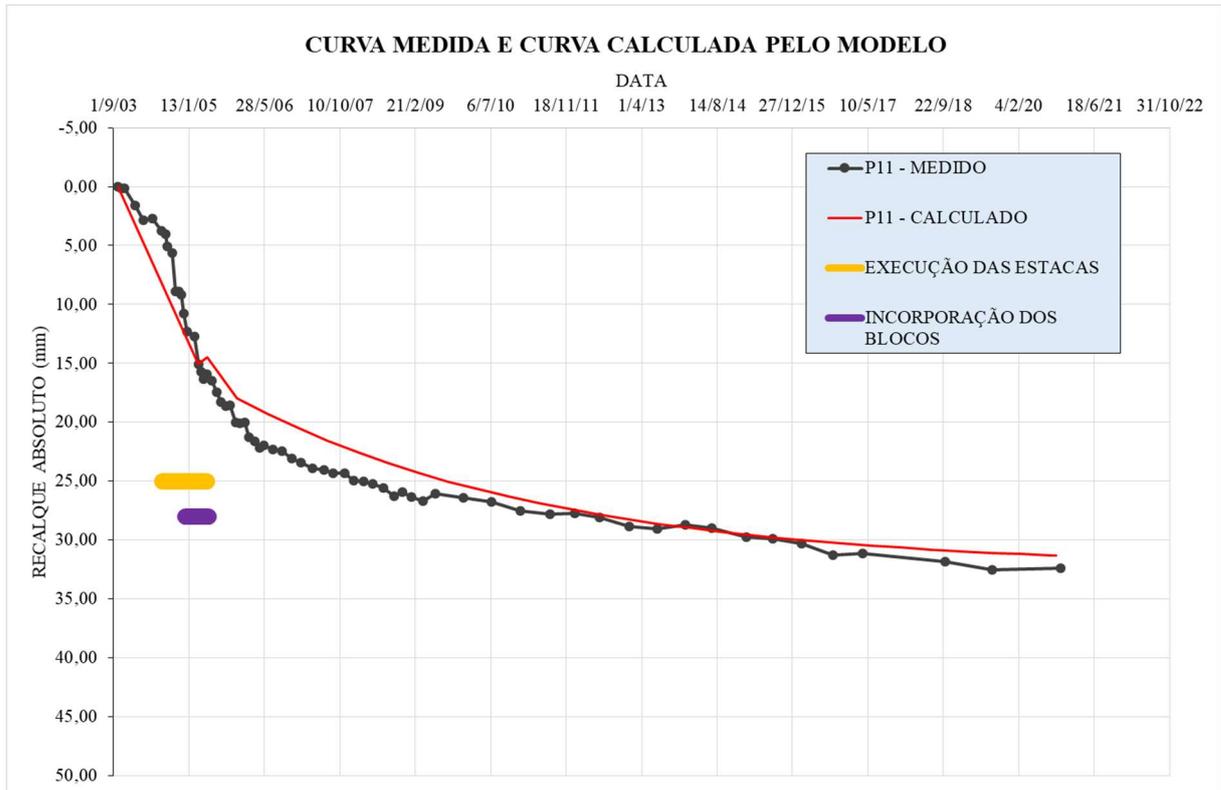
Leitura	Data	ΔT (dias)	S (mm)
	17/06/2006	400	19,29
	03/01/2007	600	20,49
	22/07/2007	800	21,58
	07/02/2008	1000	22,58
	25/08/2008	1200	23,48
	13/03/2009	1400	24,30
	29/09/2009	1600	25,04
	17/04/2010	1800	25,71
	03/11/2010	2000	26,33
	22/05/2011	2200	26,88
	08/12/2011	2400	27,39
	25/06/2012	2600	27,85
	11/01/2013	2800	28,26
	30/07/2013	3000	28,64
	15/02/2014	3200	28,99
	03/09/2014	3400	29,30
	22/03/2015	3600	29,58
	08/10/2015	3800	29,84
	25/04/2016	4000	30,07
	11/11/2016	4200	30,29
	30/05/2017	4400	30,48
	16/12/2017	4600	30,65
	04/07/2018	4800	30,81
	20/01/2019	5000	30,96
	08/08/2019	5200	31,09
	24/02/2020	5400	31,21
	11/09/2020	5600	31,31
L68	09/10/2020	5628	31,33

Fonte: Autora (2022)

Os valores de L1 a L18 correspondem ao trecho A (momento antes do início do reforço na fundação); os valores de L18 a L21, o trecho B (durante a cravação de estacas); e a partir da L21 a L68, o trecho C (momento a partir da incorporação das estacas aos blocos até a última medição realizada).

Após definir os valores da tabela é possível elaborar o gráfico apresentado na Figura 72, com a curva formada pelo modelo proposto sobreposta aos valores medidos de recalque durante toda a obra.

Figura 72 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o P11



Fonte: Autora (2022)

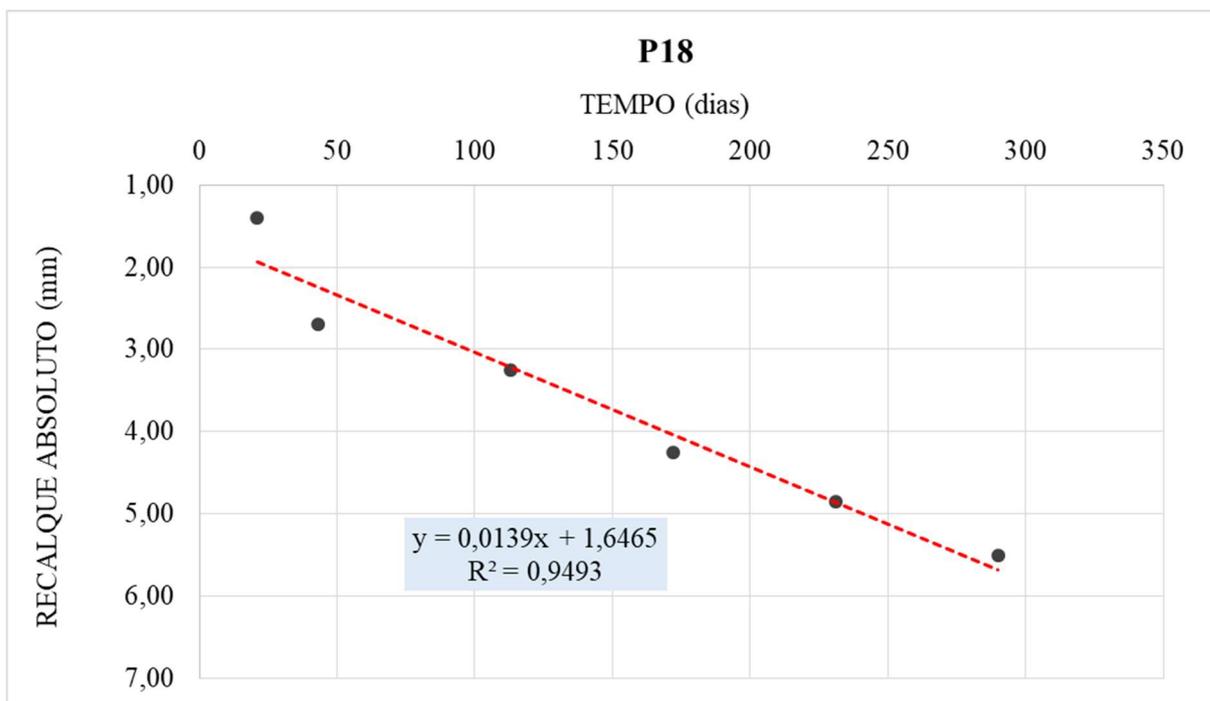
Observa-se que assim como os no pilar P1, no pilar P11 se comporta da mesma maneira com foi explicado para esse mesmo trecho.

3. Resultados de aplicação do modelo para os pilares P18

a. Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do P18 nas medições L2 a L7 e o tempo acumulado em dias foi gerado o gráfico da Figura 73.

Figura 73 – Tempo x recalque do trecho A para o P18



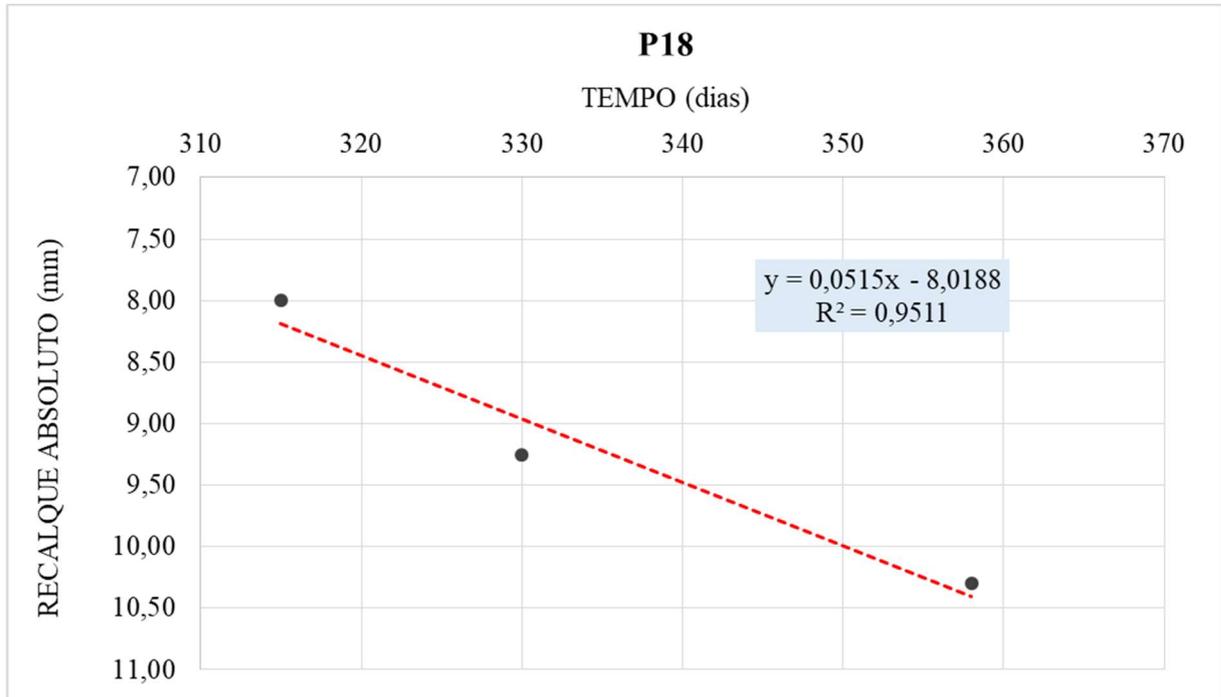
Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_a é de 13,875 micra/dia, correspondente à velocidade histórica de recalque, antes de qualquer intervenção na obra.

b. Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do P2 nas medições L8 a L10 e o tempo acumulado em dias, foi gerado o gráfico da Figura 74.

Figura 74 – Tempo x recalque do trecho B para o P18



Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_b é de 51,452 micra/dia, correspondente à velocidade após o início da cravação das estacas até o momento antes do início incorporação das estacas aos blocos. O valor do fator μ foi de 3,71 e percebe-se um aumento aproximado de 370% do valor da V_a .

c. Trecho C: Início da incorporação até L63

Com base nos valores de recalque do P18 nas medições L16 a L63 e o tempo acumulado em dias foram encontrados os valores de $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right]$ e Δt , apresentados na Tabela 14 e gerado o gráfico da Figura 75.

Tabela 14 – Regressão linear do trecho C do P18

(Continua)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
16	0	0,0000
17	46	0,0478
18	74	0,0798
19	93	0,0798

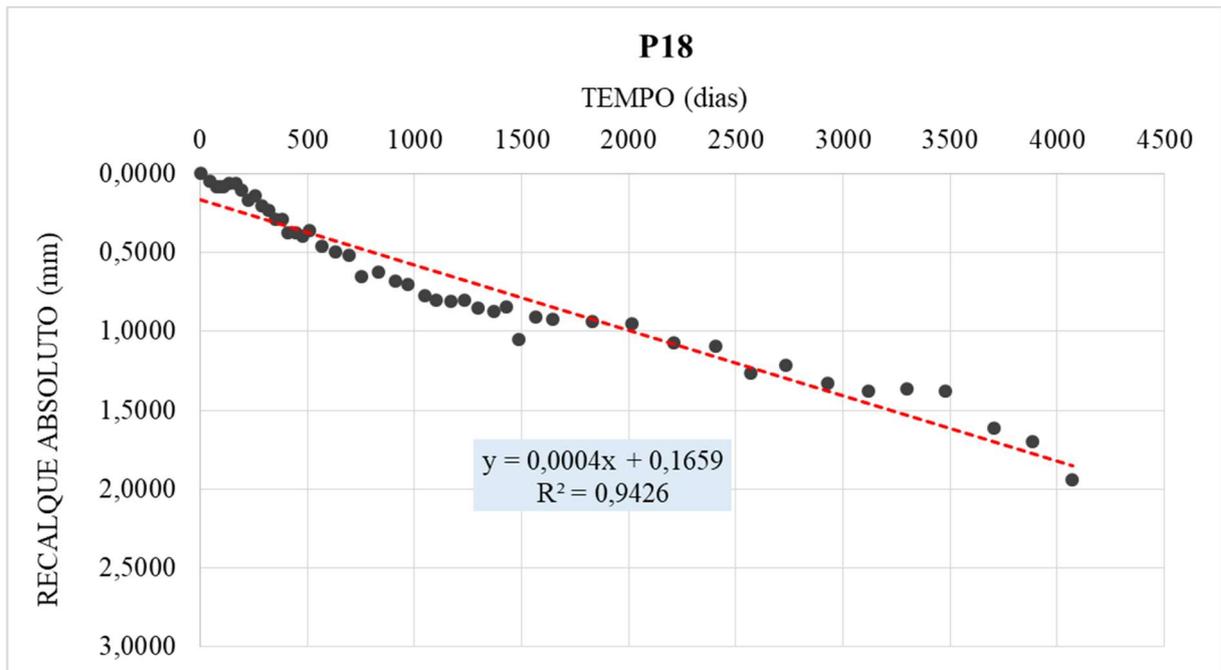
(Continua)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln(S3-S)/(S3-S2)$
16	0	0,0000
17	46	0,0478
18	74	0,0798
19	93	0,0798
20	110	0,0798
21	132	0,0619
22	163	0,0619
23	194	0,1054
24	223	0,1666
25	256	0,1432
26	286	0,2068
27	320	0,2359
28	350	0,2879
29	381	0,2879
30	411	0,3714
31	445	0,3762
32	478	0,3958
33	507	0,3617
34	565	0,4571
35	629	0,4947
36	695	0,5168
37	752	0,6545
38	829	0,6217
39	908	0,6832
40	968	0,6992
41	1046	0,7759
42	1101	0,8008
43	1167	0,8098
44	1230	0,7993
45	1298	0,8526
46	1369	0,8700
47	1426	0,8464
48	1487	1,0492
49	1563	0,9073
50	1643	0,9223
51	1832	0,9358
52	2015	0,9478
53	2209	1,0723
54	2403	1,0959

(Conclusão)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln(S_3 - S)/(S_3 - S_2)$
55	2567	1,2675
56	2733	1,2145
57	2930	1,3311
58	3117	1,3777
59	3300	1,3619
60	3477	1,3750
61	3706	1,6121
62	3883	1,6994
63	4070	1,9373

Fonte: Autora (2022)

Figura 75 – Tempo x $-\ln(S_3 - S)/(S_3 - S_2)$ 

Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para λ é de $0,00041338 \text{ dias}^{-1}$.

Aplicando agora o modelo proposto por Gusmão (2006), com as datas das leituras, intervalo de tempo das medições e recalque absoluto e cada leitura, é formada a Tabela 15.

Tabela 15 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C do P18

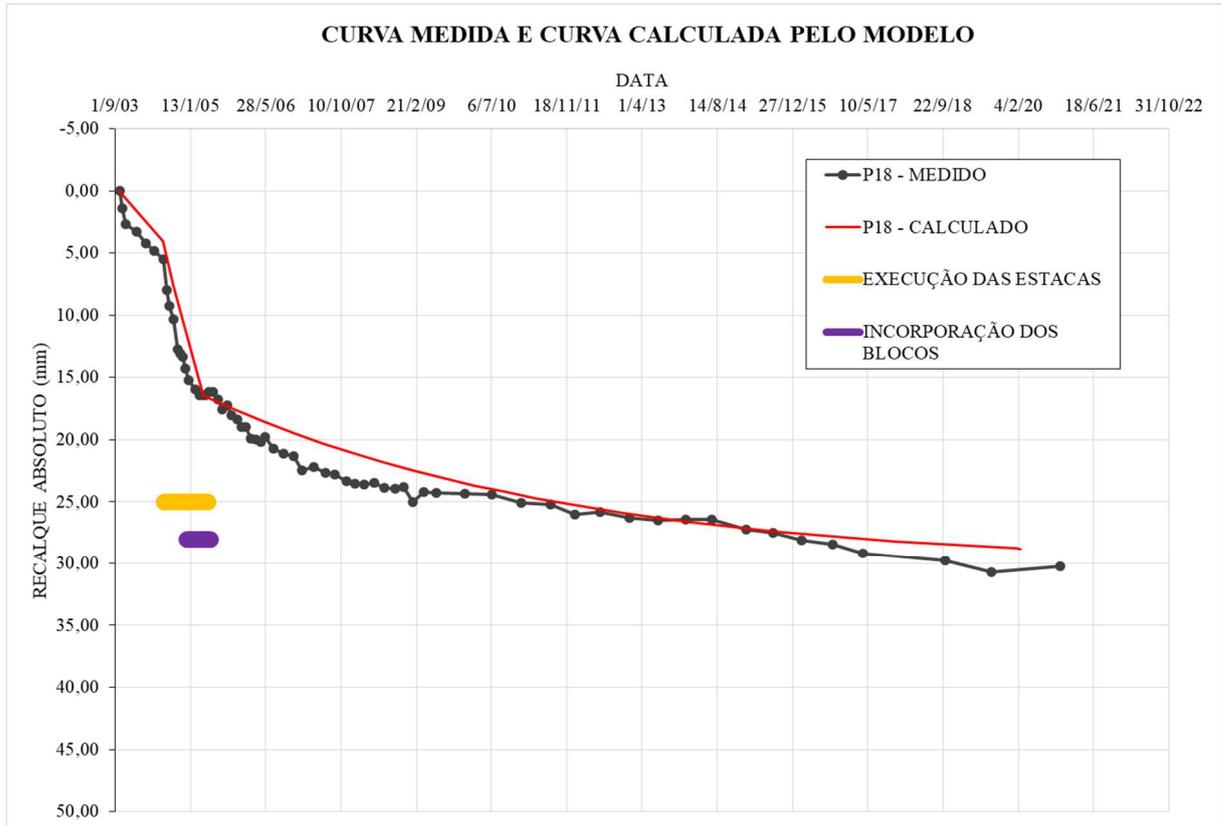
Leitura	Data	T (dias)	S (mm)
L1	29/09/2003	0	0,00
L7	15/07/2004	290	4,02
L10	21/09/2004	68	7,52
	09/04/2005	200	16,44
	26/10/2005	400	17,53
	14/05/2006	600	18,54
	30/11/2006	800	19,47
	18/06/2007	1000	20,33
	04/01/2008	1200	21,11
	22/07/2008	1400	21,84
	07/02/2009	1600	22,50
	26/08/2009	1800	23,12
	14/03/2010	2000	23,68
	30/09/2010	2200	24,20
	18/04/2011	2400	24,68
	04/11/2011	2600	25,12
	22/05/2012	2800	25,53
	08/12/2012	3000	25,90
	26/06/2013	3200	26,25
	12/01/2014	3400	26,56
	31/07/2014	3600	26,86
	16/02/2015	3800	27,12
	04/09/2015	4000	27,37
	22/03/2016	4200	27,60
	08/10/2016	4400	27,81
	26/04/2017	4600	28,00
	12/11/2017	4800	28,18
	31/05/2018	5000	28,34
	17/12/2018	5200	28,49
	05/07/2019	5400	28,63
	21/01/2020	5600	28,76
L68	18/02/2020	5628	28,78

Fonte: Autora (2022)

Os valores de L1 a L7 correspondem ao trecho A (momento antes do início do reforço na fundação); os valores de L7 a L10, o trecho B (durante a cravação de estacas); e a partir da L10 a L68, o trecho C (momento a partir da incorporação das estacas aos blocos até a última medição realizada).

Após definir os valores da tabela é possível elaborar o gráfico apresentado na Figura 76 com a curva formada pelo modelo proposto sobreposta aos valores medidos de recalque durante toda a obra.

Figura 76 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o P18



Fonte: Autora (2022)

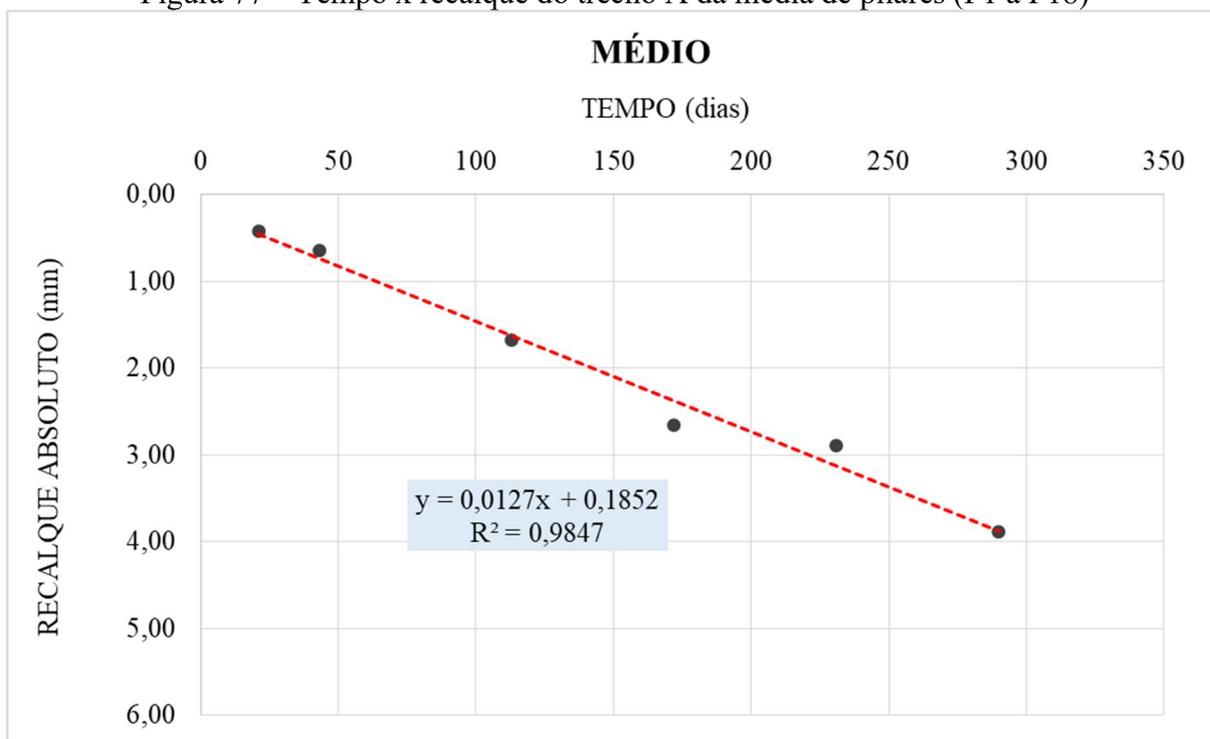
Observa-se que assim como os no pilar P1, o pilar P18 se comporta da mesma maneira com foi explicado para esse mesmo trecho.

4. Resultados de aplicação do modelo para média dos pilares (P1 a P18)

a. Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque médio dos pilares (P1 a P18) nas medições L2 a L7 e o tempo acumulado em dias, foi gerado o gráfico da Figura 77.

Figura 77 – Tempo x recalque do trecho A da média de pilares (P1 a P18)



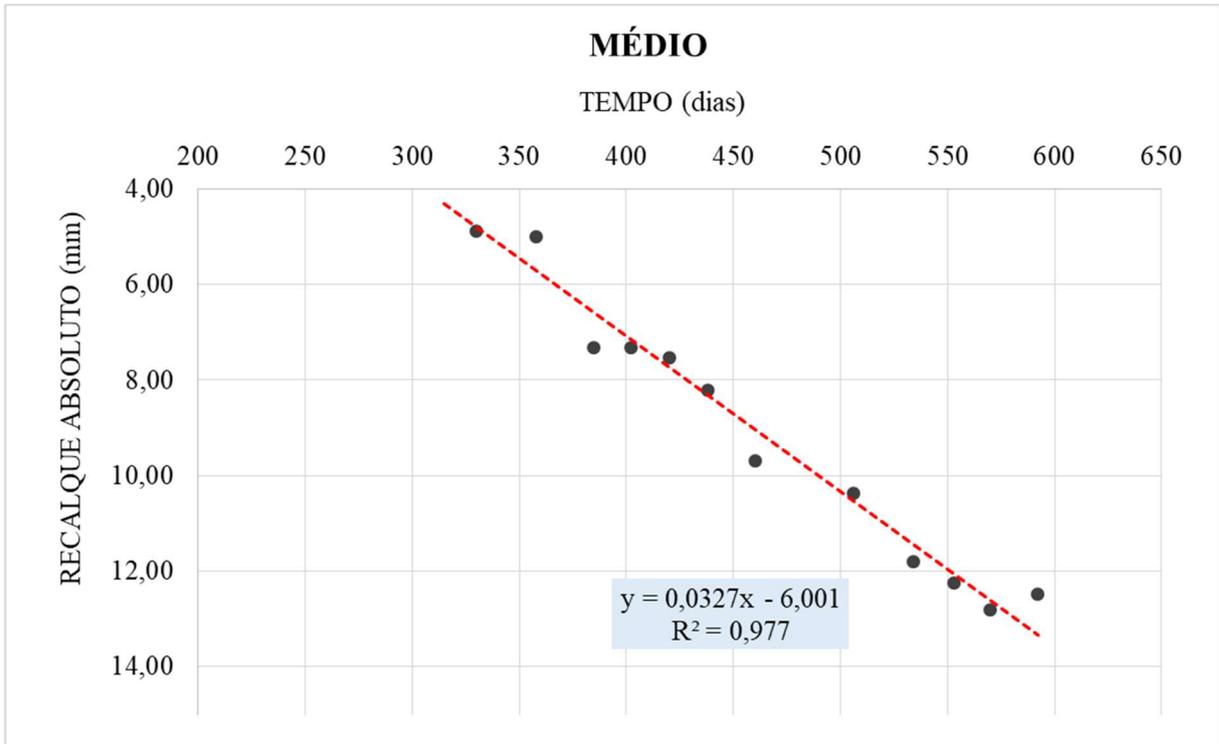
Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_a é de 12,730 micra/dia, correspondente à velocidade histórica de recalque, antes de qualquer intervenção na obra.

b. Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque médio dos pilares (P1 a P18) nas medições L8 a L21 e o tempo acumulado em dias, foi gerado o gráfico da Figura 78.

Figura 78 – Tempo x recalque do trecho B da média de pilares (P1 a P18)



Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_b é de 32,678 micra/dia, correspondente à velocidade após o início da cravação das estacas até o momento antes do início incorporação das estacas aos blocos. O valor do fator μ foi de 2,57 e percebe-se um aumento aproximado de 250% do valor da V_a .

c. Trecho C: Início da incorporação até L66

Com base nos valores de recalque do P2 nas medições L22 a L66 e o tempo acumulado em dias, foram encontrados os valores de $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right]$ e Δt , apresentados na Tabela 16 e gerado o gráfico da Figura 79.

Tabela 16 – Regressão linear do trecho C da média de pilares (P1 a P18)

(Continua)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
22	0	0,0000
23	31	0,0266

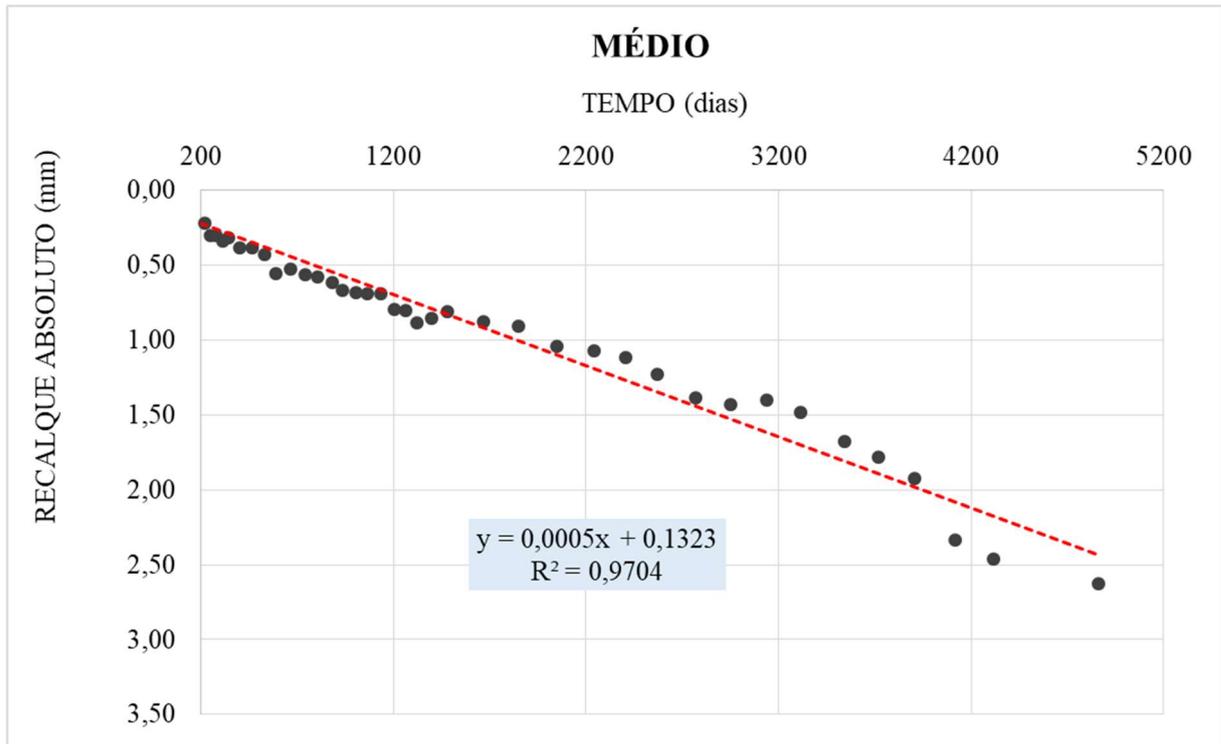
(Continua)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
24	60	0,0809
25	93	0,0882
26	123	0,0954
27	157	0,1734
28	187	0,1940
29	218	0,2223
30	248	0,3029
31	282	0,3080
32	315	0,3393
33	344	0,3203
34	402	0,3842
35	466	0,3849
36	532	0,4315
37	589	0,5600
38	666	0,5272
39	745	0,5647
40	805	0,5790
41	883	0,6213
42	938	0,6734
43	1004	0,6864
44	1067	0,6892
45	1135	0,6957
46	1206	0,7950
47	1263	0,8042
48	1324	0,8891
49	1400	0,8537
50	1480	0,8108
51	1669	0,8773
52	1852	0,9100
53	2046	1,0449
54	2240	1,0762
55	2404	1,1156
56	2570	1,2323
57	2767	1,3849
58	2954	1,4307
59	3137	1,3987
60	3314	1,4856
61	3543	1,6791
62	3720	1,7843

(Conclusão)

Leitura	Δt (dias)	$-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
63	3907	1,9264
64	4117	2,3389
65	4316	2,4621
66	4862	2,6272

Fonte: Autora (2022)

Figura 79 – Tempo x $-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$ 

Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para λ é de $0,000474 \text{ dias}^{-1}$.

Aplicando agora o modelo proposto por Gusmão (2006), com as datas das leituras, intervalo de tempo das medições e recalque absoluto e cada leitura, é formada a Tabela 17.

Tabela 17 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C da média de pilares (P1 a P18)

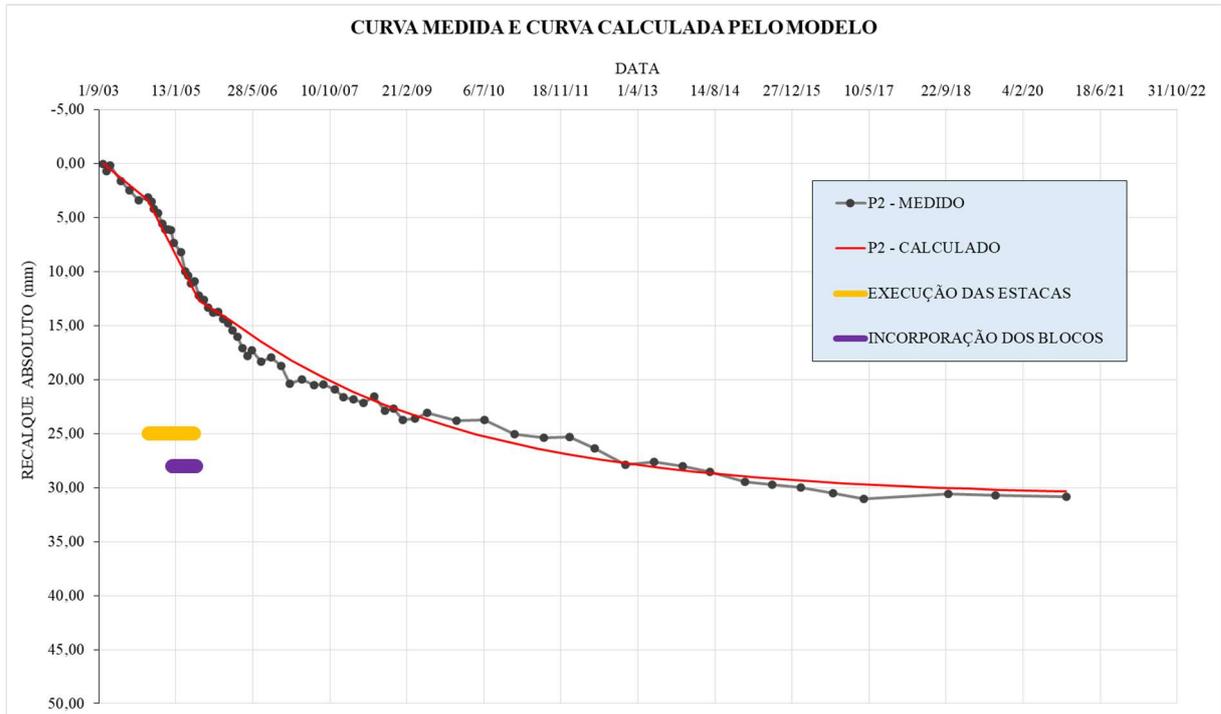
Leitura	Data	T (dias)	S (mm)
L1	29/09/2003	0	0,00
L7	15/07/2004	290	3,69
L22	13/06/2005	333	14,57
	30/12/2005	200	14,96
	18/07/2006	400	16,33
	03/02/2007	600	17,58
	22/08/2007	800	18,72
	09/03/2008	1000	19,75
	25/09/2008	1200	20,69
	13/04/2009	1400	21,54
	30/10/2009	1600	22,32
	18/05/2010	1800	23,03
	04/12/2010	2000	23,67
	22/06/2011	2200	24,26
	08/01/2012	2400	24,79
	26/07/2012	2600	25,28
	11/02/2013	2800	25,72
	30/08/2013	3000	26,12
	18/03/2014	3200	26,48
	04/10/2014	3400	26,81
	22/04/2015	3600	27,11
	08/11/2015	3800	27,39
	26/05/2016	4000	27,64
	12/12/2016	4200	27,86
	30/06/2017	4400	28,07
	16/01/2018	4600	28,26
	04/08/2018	4800	28,43
	20/02/2019	5000	28,58
	08/09/2019	5200	28,73
	26/03/2020	5400	28,85
	12/10/2020	5600	28,97
L68	09/11/2020	5628	28,99

Fonte: Autora (2022)

Os valores de L1 a L7 correspondem ao trecho A (momento antes do início do reforço na fundação); os valores de L7 a L22, o trecho B (durante a cravação de estacas); e a partir da L22 a L68, o trecho C (momento a partir da incorporação das estacas aos blocos até a última medição realizada).

Após definir os valores da tabela é possível elaborar o gráfico apresentado na Figura 80, com a curva formada pelo modelo proposto sobreposta aos valores medidos de recalque durante toda a obra.

Figura 80 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para média de pilares (P1 a P18)



Fonte: Autora (2022)

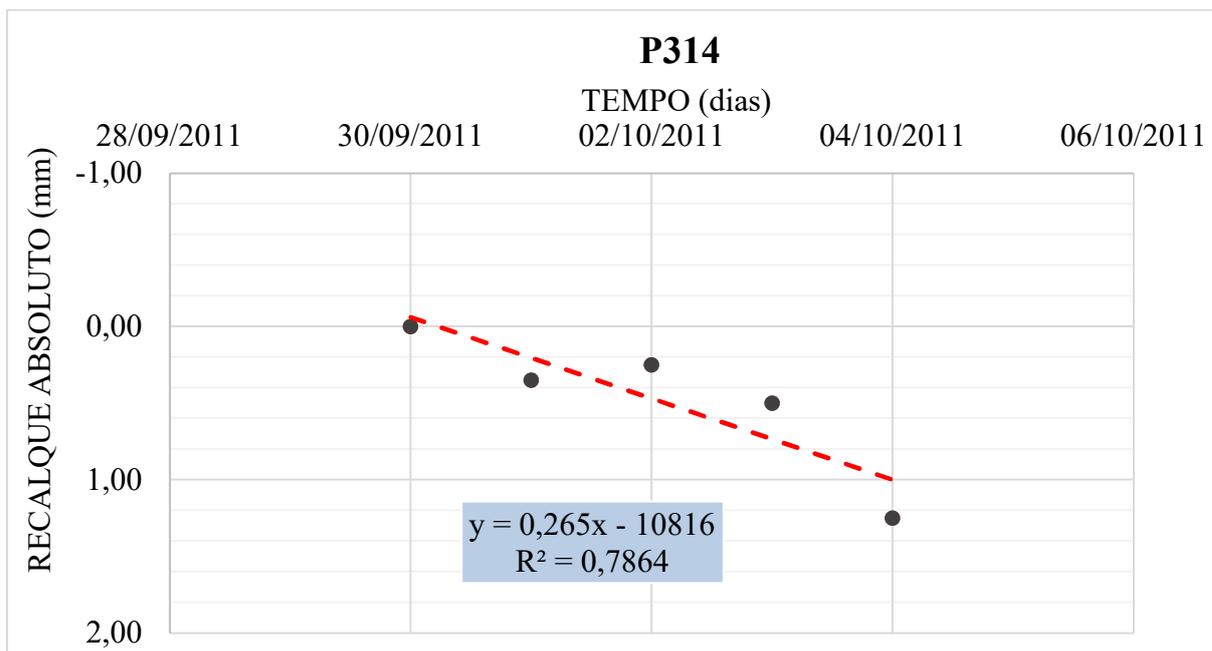
Observa-se que assim como os no pilar P1, para a média dos pilares a curva se comporta da mesma maneira com foi explicado para esse mesmo trecho.

5. Resultados de aplicação do modelo para o pilar P314

a. Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do pilar P314 e o tempo acumulado em dias, foi gerado o gráfico da Figura 81.

Figura 81 – Tempo x recalque do trecho A do pilar P314



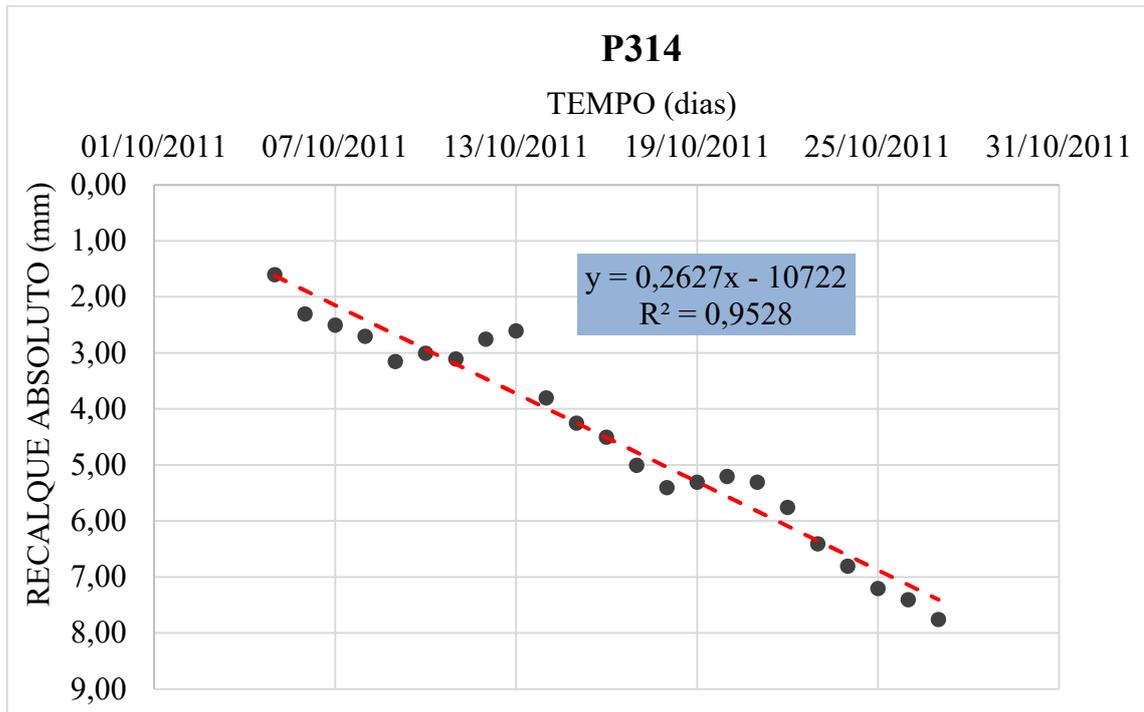
Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_a é de 265 micra/dia, correspondente à velocidade histórica de recalque, antes de qualquer intervenção na obra.

b. Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do pilar P314 e o tempo acumulado em dias, foi gerado o gráfico da Figura 82.

Figura 82 – Tempo x recalque do trecho A do pilar P314



Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_b é de 262,7 micra/dia, correspondente à velocidade após o início da cravação das estacas até o momento antes do início incorporação das estacas aos blocos. O valor do fator μ foi de 0,99 e percebe-se redução aproximada da velocidade de 1% do valor da V_a .

c. Trecho C: Início da incorporação do bloco

Com base nos valores de recalque do P314 e o tempo acumulado em dias, foram encontrados os valores de $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right]$ e Δt , apresentados na Tabela 18 e gerado o gráfico da Figura 83.

Tabela 18 – Regressão linear do trecho C do pilar P314

(Continua)

DT (dias)	$-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
1	0,0000
2	0,0000
3	0,0000
4	0,0000

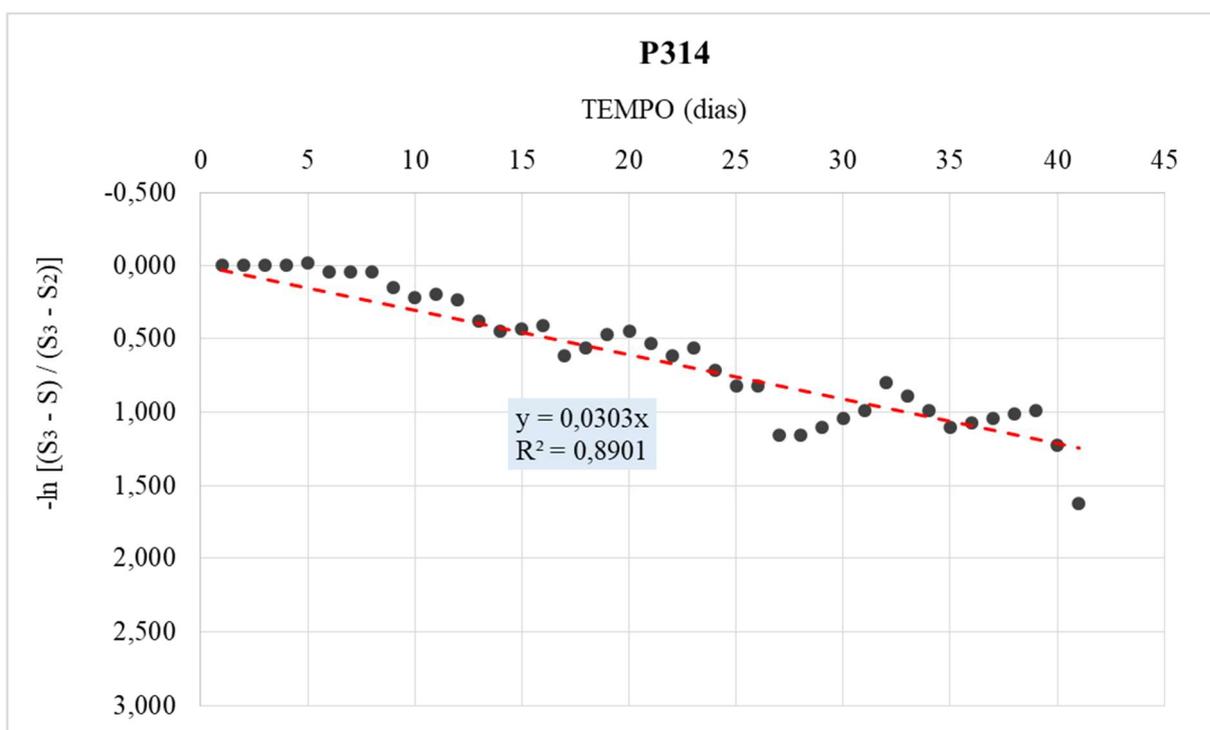
(Continua)

DT (dias)	$-\ln(S3-S)/(S3-S2)$
1	0,0000
2	0,0000
3	0,0000
4	0,0000
5	-0,0194
6	0,0400
7	0,0400
8	0,0400
9	0,1476
10	0,2183
11	0,1942
12	0,2305
13	0,3765
14	0,4506
15	0,4353
16	0,4055
17	0,6176
18	0,5645
19	0,4661
20	0,4506
21	0,5306
22	0,6176
23	0,5645
24	0,7129
25	0,8183
26	0,8228
27	1,1592
28	1,1592
29	1,0986
30	1,0415
31	0,9874
32	0,7963
33	0,8873
34	0,9874
35	1,0986
36	1,0696
37	1,0415
38	1,0141
39	0,9874

(Conclusão)

DT (dias)	$-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
40	1,2238
41	1,6292
42	2,0600
43	2,2271
44	2,9763
45	3,2387
46	2,3224
47	1,7346

Fonte: Autora (2022)

Figura 83 – Tempo x $-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$ 

Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para λ é de $0,03040 \text{ dias}^{-1}$.

Aplicando agora o modelo proposto por Gusmão (2006), com as datas das leituras, intervalo de tempo das medições e recalque absoluto e cada leitura, é formada a Tabela 19.

Tabela 19 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C do pilar P314

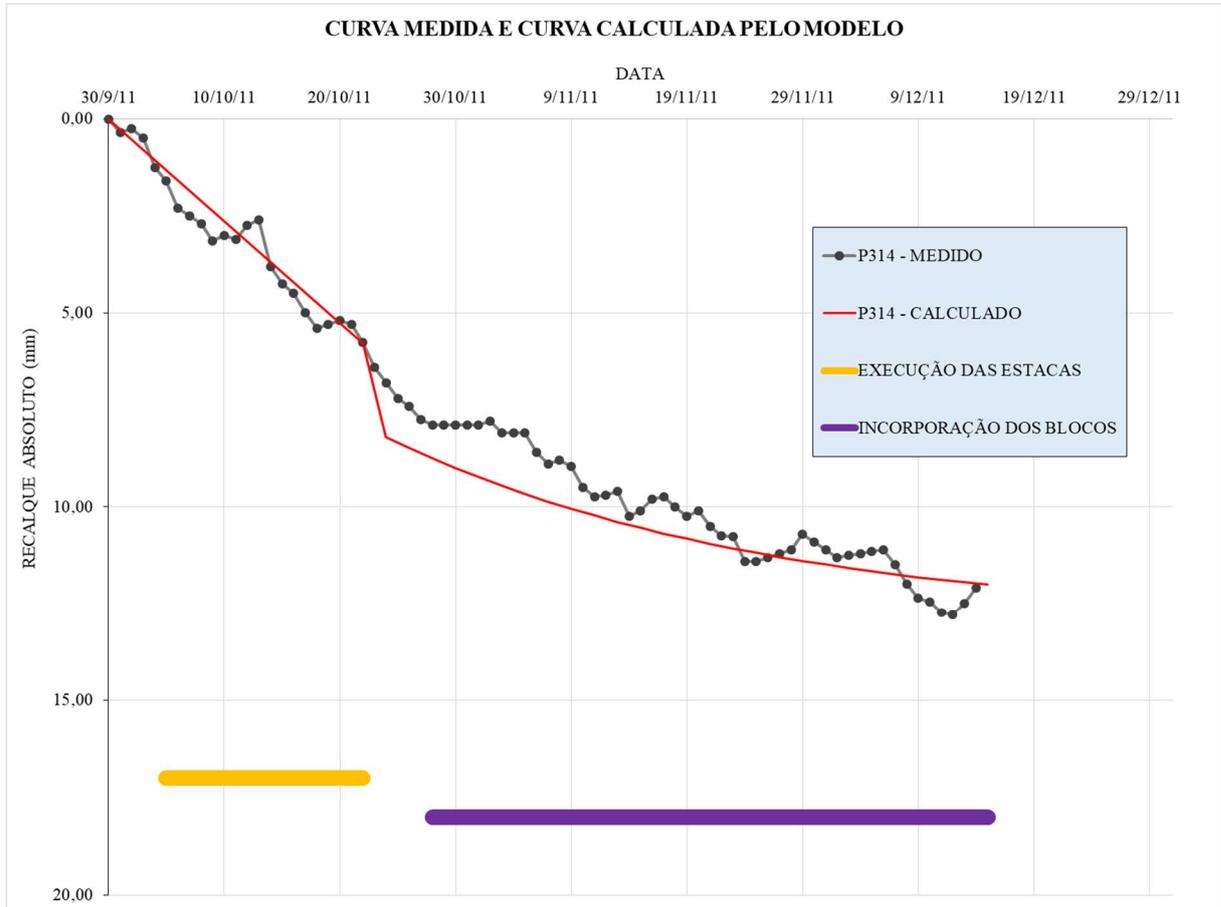
Data	DT (dias)	S (mm)
30/09/2011	0	0,00
05/10/2011	5	1,33
22/10/2011	17	5,79
24/10/2011	2	8,20
26/10/2011	4	8,48
28/10/2011	6	8,75
30/10/2011	8	9,00
01/11/2011	10	9,24
03/11/2011	12	9,46
05/11/2011	14	9,67
07/11/2011	16	9,86
09/11/2011	18	10,05
11/11/2011	20	10,22
13/11/2011	22	10,39
15/11/2011	24	10,54
17/11/2011	26	10,69
19/11/2011	28	10,82
21/11/2011	30	10,95
23/11/2011	32	11,07
25/11/2011	34	11,19
27/11/2011	36	11,29
29/11/2011	38	11,39
01/12/2011	40	11,49
03/12/2011	42	11,58
05/12/2011	44	11,66
07/12/2011	46	11,74
09/12/2011	48	11,81
11/12/2011	50	11,88
13/12/2011	52	11,95
15/12/2011	54	12,01

Fonte: Autora (2022)

Os valores do dia 30/09/2011 a 05/10/2011 correspondem ao trecho A (momento antes do início do reforço na fundação); os valores de 05/10/2011 a 22/10/2011, o trecho B (durante a cravação de estacas); e a partir do dia 24/10/2011, o trecho C (momento a partir da incorporação das estacas aos blocos até a última medição realizada).

Após definir os valores da tabela é possível elaborar o gráfico apresentado na Figura 84, com a curva formada pelo modelo proposto sobreposta aos valores medidos de recalque durante toda a obra.

Figura 84 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o pilar P314



Fonte: Autora (2022)

Observa-se que assim como os no pilar P305, o pilar P314 se comporta da mesma maneira com foi explicado para esse mesmo trecho.

6. Resultados da aplicação do modelo para o pilar P332

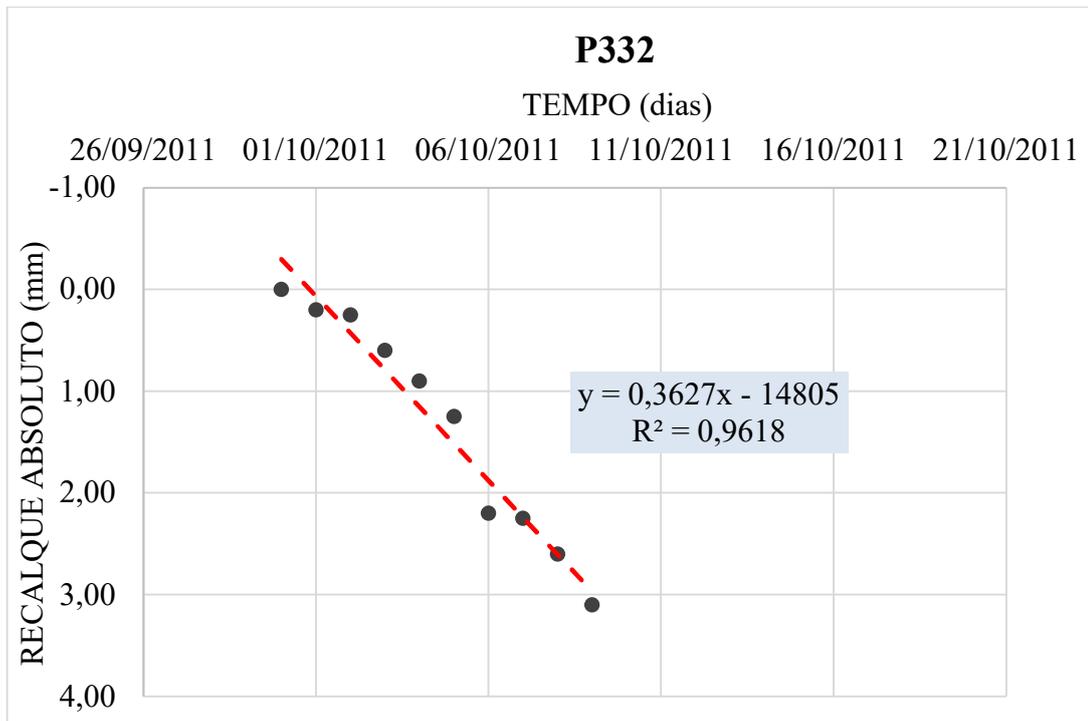
a. Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Para esse trecho não houve monitoramento então, não foi calculada a velocidade para o trecho A.

b. Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do pilar P332 e o tempo acumulado em dias, foi gerado o gráfico da Figura 85.

Figura 85 – Tempo x recalque do trecho B do pilar P332



Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_b é de 362,727 micra/dia, correspondente à velocidade após o início da cravação das estacas até o momento antes do início incorporação das estacas aos blocos. Não foi possível encontrar o valor do fator μ , já que não houve como calcular o valor de velocidade de V_a .

c. Trecho C: Início da incorporação

Com base nos valores de recalque do P332 e o tempo acumulado em dias, foram encontrados

os valores de $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right]$ e Δt , apresentados na Tabela 20 e gerado o gráfico da Figura 86.

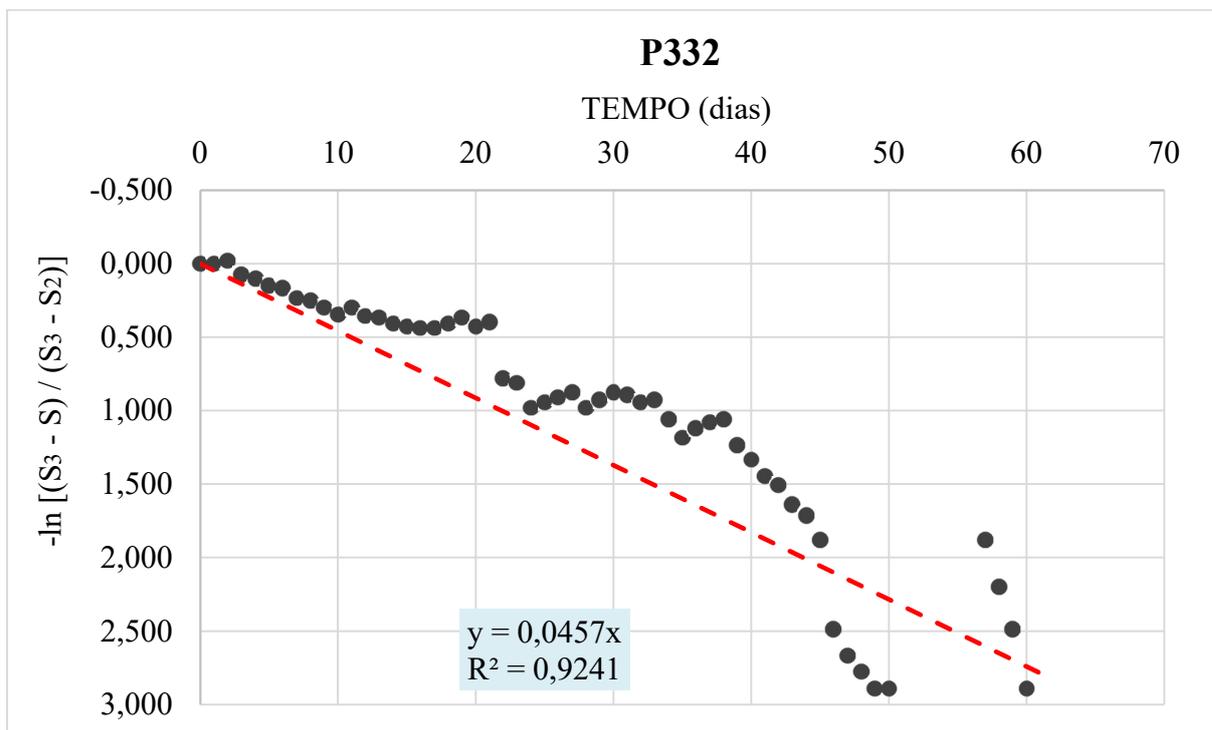
Tabela 20 – Regressão linear do trecho C da média de pilares (P332)

(Continua)

DT (dias)	$-\ln(S_3 - S) / (S_3 - S_2)$
0	0,0000
1	0,0000
2	-0,0206
3	0,0720
4	0,1023
5	0,1495
6	0,1658
7	0,2336
8	0,2513
9	0,2970
10	0,3448
11	0,2970
12	0,3547
13	0,3646
14	0,4055
15	0,4265
16	0,4372
17	0,4372
18	0,4055
19	0,3646
20	0,4265
21	0,3951
22	0,7802
23	0,8109
24	0,9808
25	0,9445
26	0,9094
27	0,8755
28	0,9808
29	0,9268
30	0,8755
31	0,8923
32	0,9445
33	0,9268
34	1,0578
35	1,1856
36	1,1197
37	1,0780

(Conclusão)	
DT (dias)	$-\ln(S3 - S) / (S3 - S2)$
38	1,0578
39	1,2321
40	1,3322
41	1,4435
42	1,5041
43	1,6376
44	1,7117
45	1,8788
46	2,4849
47	2,6672
48	2,7726
49	2,8904
50	2,8904
51	3,8712
52	3,1781
53	3,1781
54	3,1781
55	3,1781
56	3,1781
57	1,8788
58	2,1972
59	2,4849
60	2,8904
61	3,5835
62	3,1781
63	4,2767

Fonte: Autora (2022)

Figura 86 – Tempo x $-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$ 

Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para λ é de $0,04570 \text{ dias}^{-1}$.

Aplicando agora o modelo proposto por Gusmão (2006), com as datas das leituras, intervalo de tempo das medições e recalque absoluto e cada leitura, é formada a Tabela 21.

Tabela 21 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C do pilar P332

(Continua)

Data	T (dias)	S (mm)
30/09/2011	2	0,00
04/10/2011	4	1,45
06/10/2011	6	2,18
08/10/2011	8	2,90
10/10/2011	2	3,53
12/10/2011	4	4,10
14/10/2011	6	4,63
16/10/2011	8	5,10
18/10/2011	10	5,54
20/10/2011	12	5,94

(Conclusão)

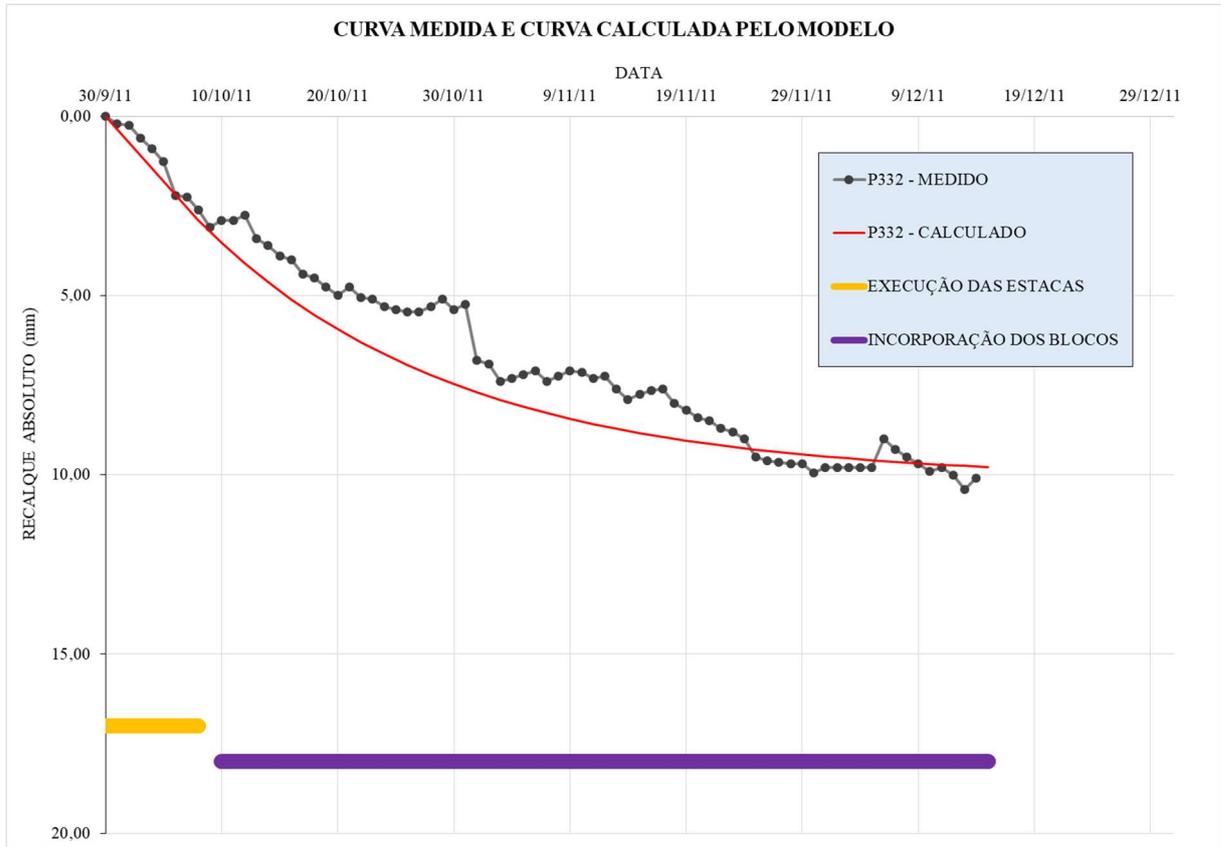
Data	T (dias)	S (mm)
22/10/2011	14	6,30
24/10/2011	16	6,63
26/10/2011	18	6,94
28/10/2011	20	7,21
30/10/2011	22	7,47
01/11/2011	24	7,70
03/11/2011	26	7,91
05/11/2011	28	8,10
07/11/2011	30	8,27
09/11/2011	32	8,43
11/11/2011	34	8,58
13/11/2011	36	8,71
15/11/2011	38	8,83
17/11/2011	40	8,94
19/11/2011	42	9,04
21/11/2011	44	9,14
23/11/2011	46	9,22
25/11/2011	48	9,30
27/11/2011	50	9,37
29/11/2011	52	9,43
01/12/2011	54	9,49
03/12/2011	56	9,54
05/12/2011	58	9,59
07/12/2011	60	9,64
09/12/2011	62	9,68
11/12/2011	64	9,71
13/12/2011	66	9,75
15/12/2011	68	9,78

Fonte: Autora (2022)

Os valores de 30/09/2011 a 08/10/2011, o trecho B (durante a cravação de estacas); e a partir do dia 10/10/2011, o trecho C (momento a partir da incorporação das estacas aos blocos até a última medição realizada).

Após definir os valores da tabela é possível elaborar o gráfico apresentado na Figura 87, com a curva formada pelo modelo proposto sobreposta aos valores medidos de recalque durante toda a obra.

Figura 87 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o pilar P332



Fonte: Autora (2022)

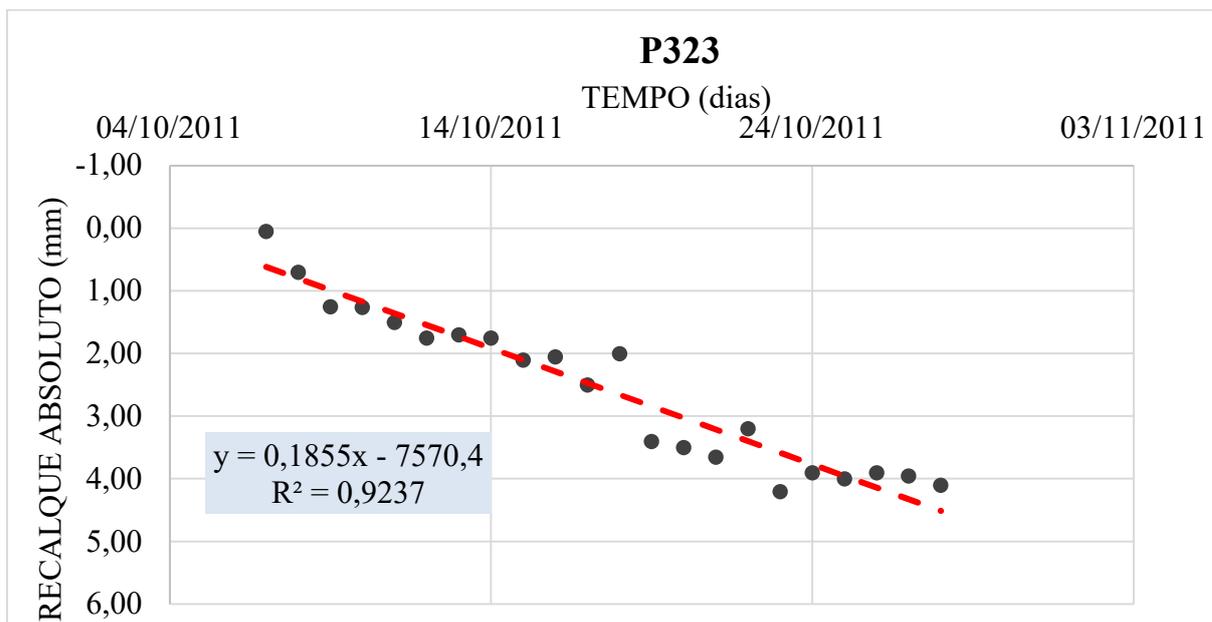
Observa-se que assim como os no pilar P305, o pilar P332 se comporta da mesma maneira com foi explicado para esse mesmo trecho.

7. Resultados da aplicação do modelo para o pilar P323

a. Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do pilar P323 e o tempo acumulado em dias, foi gerado o gráfico da Figura 88.

Figura 88 – Tempo x recalque do trecho A do pilar P323



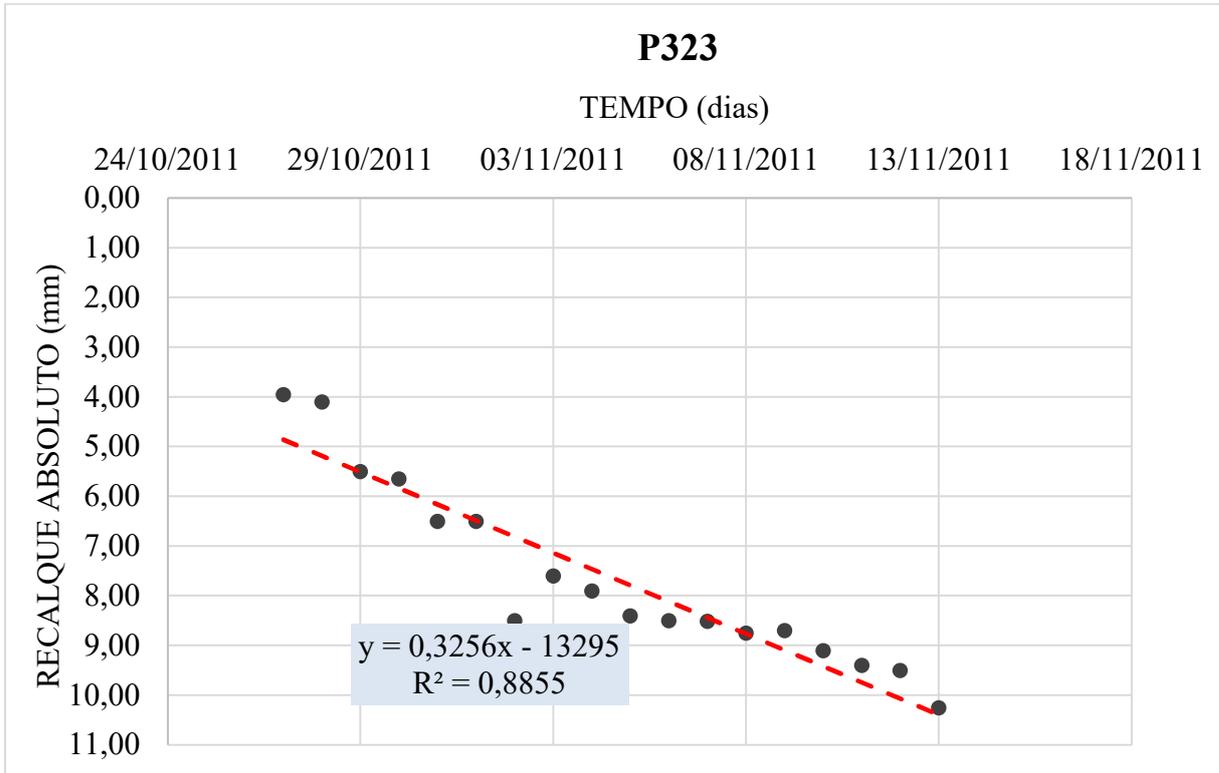
Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_a é de 194,190 micra/dia, correspondente à velocidade histórica de recalque, antes de qualquer intervenção na obra.

b. Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque do pilar P323 e o tempo acumulado em dias, foi gerado o gráfico da Figura 89.

Figura 89 – Tempo x recalque do trecho B do pilar P323



Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_b é de 325,645 micra/dia, correspondente à velocidade após o início da cravação das estacas até o momento antes do início incorporação das estacas aos blocos. O valor do fator μ foi de 1,68 e percebe-se um aumento aproximado de 168% do valor da V_a .

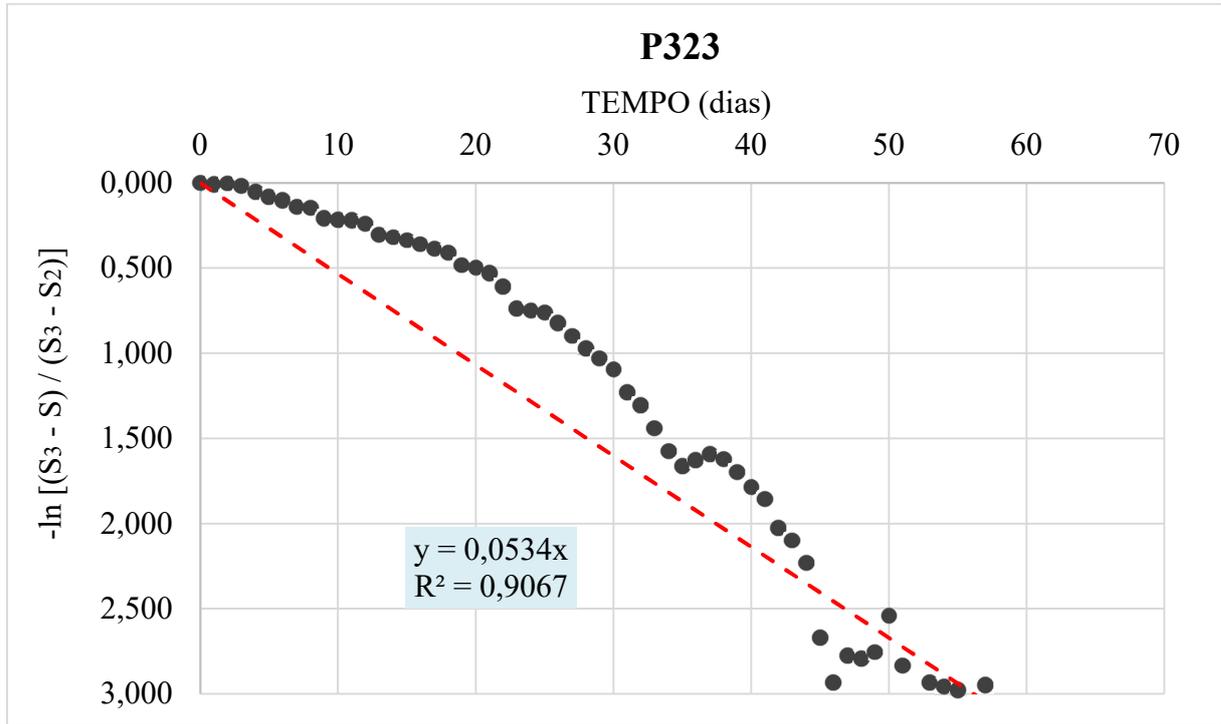
c. Trecho C: Início da incorporação

Com base nos valores de recalque do P323 e o tempo acumulado em dias, foram encontrados os valores de $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right]$ e Δt , apresentados na Tabela 22 e gerado o gráfico da Figura 90.

Tabela 22 – Regressão linear do trecho C do pilar P323

DT (dias)	$-\ln(S3-S)/(S3-S2)$
1	0,0000
2	0,0000
3	-0,0180
4	0,0953
5	0,0561
6	0,1787
7	0,3185
8	0,6061
9	0,4238
10	0,4520
11	1,2347
12	1,3683
13	1,0116
14	1,2347
15	1,3683
16	1,0116
17	1,2347
18	1,7047
19	1,2347
20	1,4424
21	1,7047
22	3,3142

Fonte: Autora (2022)

Figura 90 – Tempo x $-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$ 

Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para λ é de $0,08610 \text{ dias}^{-1}$.

Aplicando agora o modelo proposto por Gusmão (2006), com as datas das leituras, intervalo de tempo das medições e recalque absoluto e cada leitura, é formada a Tabela 23.

Tabela 23 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C do pilar P323

(Continua)

Data	DT (dias)	S (mm)
06/10/2011	0	0,00
28/10/2011	22	4,27
01/11/2011	4	5,57
03/11/2011	6	6,23
07/11/2011	10	7,53
09/11/2011	12	8,18
11/11/2011	14	8,83
13/11/2011	16	9,48
15/11/2011	2	10,69
17/11/2011	4	11,05

(Conclusão)

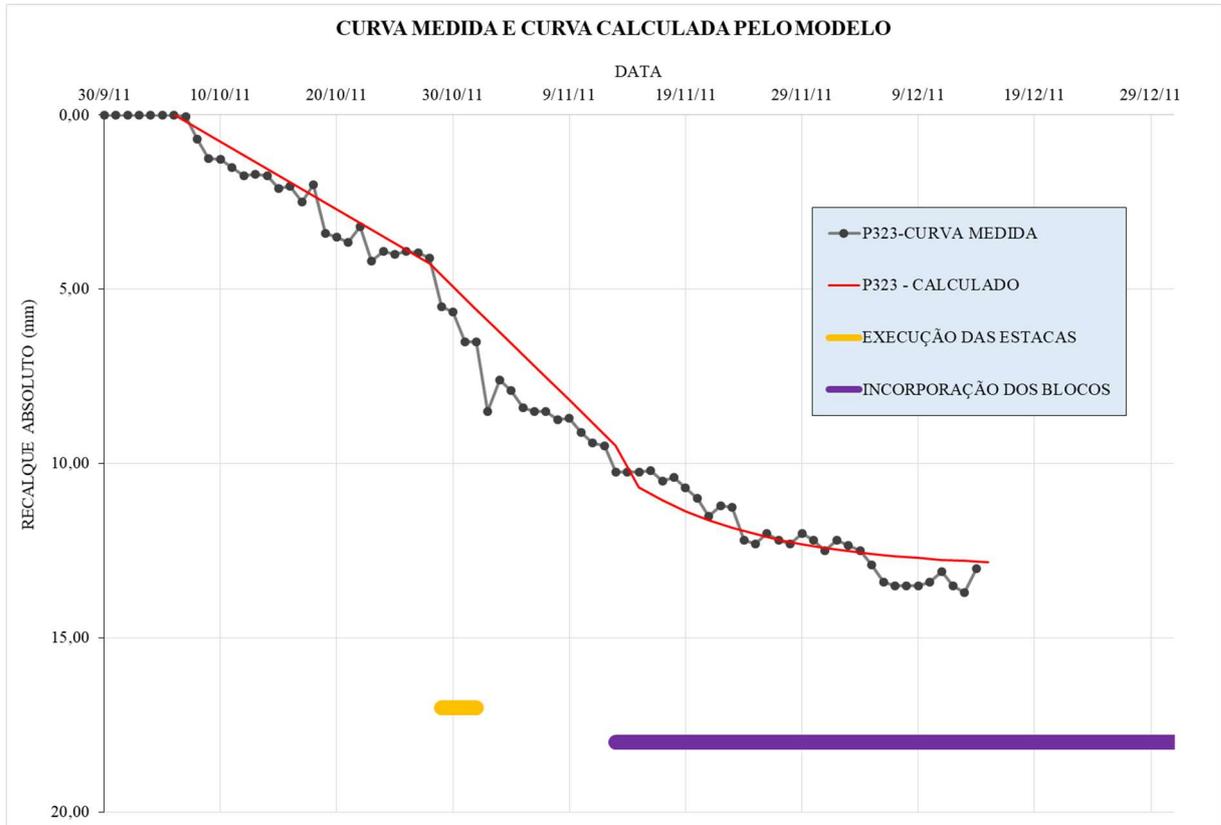
Data	DT (dias)	S (mm)
19/11/2011	6	11,36
21/11/2011	8	11,62
23/11/2011	10	11,84
25/11/2011	12	12,02
27/11/2011	14	12,18
29/11/2011	16	12,31
01/12/2011	18	12,42
03/12/2011	20	12,51
05/12/2011	22	12,59
07/12/2011	24	12,65
09/12/2011	26	12,71
11/12/2011	28	12,75
13/12/2011	30	12,79
15/12/2011	32	12,83

Fonte: Autora (2022)

Os valores do dia 06/10/2011 a 28/10/2011 correspondem ao trecho A (momento antes do início do reforço na fundação); os valores de 01/11/2011 a 13/11/2011, o trecho B (durante a cravação de estacas); e a partir do dia 15/11/2011, o trecho C (momento a partir da incorporação das estacas aos blocos até a última medição realizada).

Após definir os valores da tabela é possível elaborar o gráfico apresentado na Figura 91, com a curva formada pelo modelo proposto sobreposta aos valores medidos de recalque durante toda a obra.

Figura 91 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para o pilar P323



Fonte: Autora (2022)

Observa-se que assim como os no pilar P305, o pilar P323 se comporta da mesma maneira com foi explicado para esse mesmo trecho.

8. Resultado da aplicação do modelo para o média dos pilares P314, P332, P305, P323

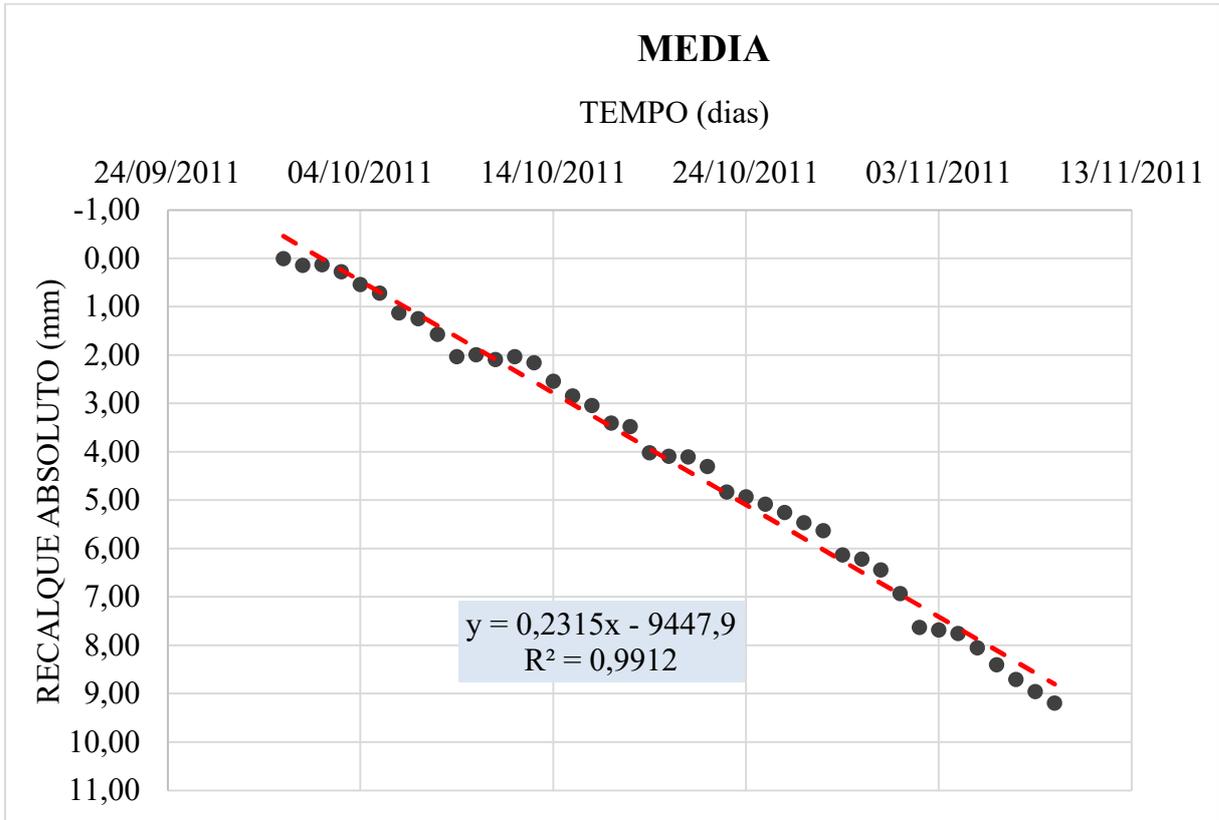
a. Trecho A: antes da execução das estacas do reforço

Para esse trecho não houve monitoramento então, não foi calculada a velocidade para o trecho A.

b. Trecho B: durante a execução das estacas do reforço

Com base nos valores de recalque médio dos pilares (P314, P332, P305, P323) e o tempo acumulado em dias, foi gerado o gráfico da Figura 92.

Figura 92 – Tempo x recalque do trecho B da média de pilares (P314, P332, P305, P323)



Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para velocidade V_b é de 231,465 micra/dia, correspondente à velocidade após o início da cravação das estacas até o momento antes do início incorporação das estacas aos blocos. O valor do fator μ não foi calculado, pois não houve medições de recalque antes do início da execução de estacas.

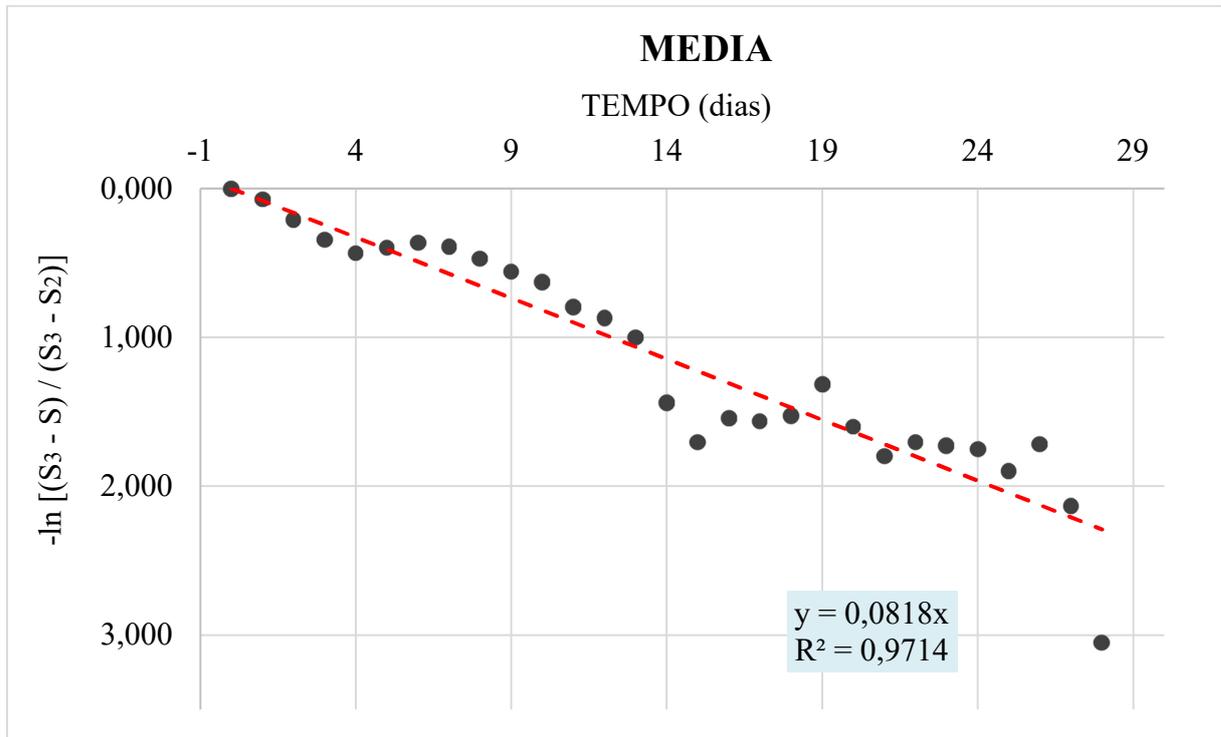
c. Trecho C: Início da incorporação

Com base nos valores de recalque da média (P314, P332, P305, P323) e o tempo acumulado em dias, foram encontrados os valores de $\ln \left[\frac{(S_3 - S)}{(S_3 - S_2)} \right]$ e Δt , apresentados na Tabela 24 e gerado o gráfico da Figura 93.

Tabela 24 – Regressão linear do trecho C da média de pilares (P314, P332, P305, P323)

DT (dias)	$-\ln(S3-S)/(S3-S2)$
0	0,0000
1	0,0738
2	0,2104
3	0,3460
4	0,4335
5	0,3976
6	0,3629
7	0,3917
8	0,4708
9	0,5567
10	0,6281
11	0,7972
12	0,8700
13	1,0029
14	1,4390
15	1,7047
16	1,5444
17	1,5631
18	1,5261
19	1,3139
20	1,6016
21	1,7957
22	1,7047
23	1,7267
24	1,7492
25	1,8958
26	1,7179
27	2,1322
28	3,0485

Fonte: Autora (2022)

Figura 93 – Tempo x $-\ln (S_3 - S) / (S_3 - S_2)$ 

Fonte: Autora (2022)

O valor encontrado para λ é de $0,0818 \text{ dias}^{-1}$.

Aplicando agora o modelo proposto por Gusmão (2006), com as datas das leituras, intervalo de tempo das medições e recalque absoluto e cada leitura, é formada a Tabela 25.

Tabela 25 – Valores para elaboração do gráfico do trecho C da média de pilares (P314, P332, P305, P323)

(Continua)

Data	DT (dias)	S (mm)
30/09/2011	2	0,00
04/10/2011	4	0,93
06/10/2011	6	1,39
08/10/2011	8	1,85
10/10/2011	10	2,31
12/10/2011	12	2,78
14/10/2011	14	3,24
16/10/2011	16	3,70
18/10/2011	18	4,17

(Continua)

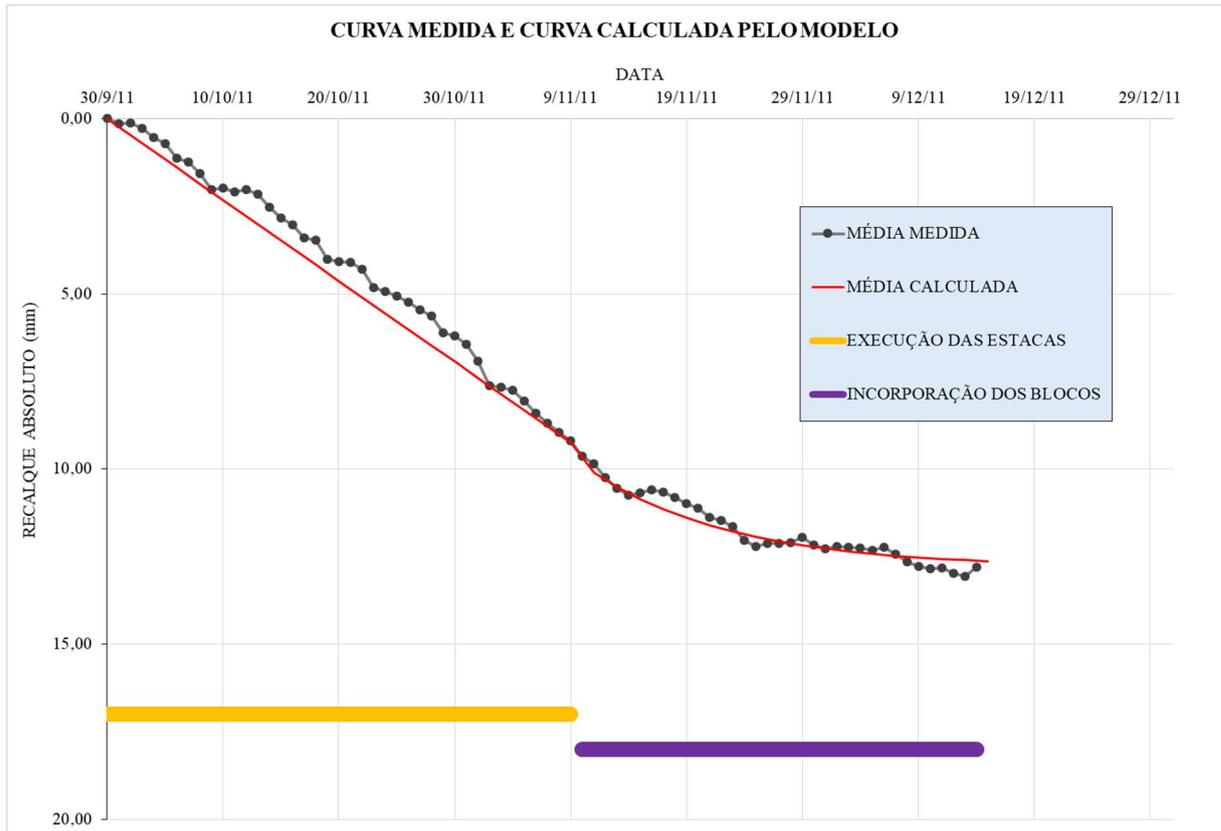
Data	DT (dias)	S (mm)
20/10/2011	20	4,63
22/10/2011	22	5,09
24/10/2011	24	5,56
26/10/2011	26	6,02
28/10/2011	28	6,48
30/10/2011	30	6,94
01/11/2011	32	7,41
03/11/2011	34	7,87
05/11/2011	36	8,33
07/11/2011	38	8,80
09/11/2011	40	9,26
11/11/2011	2	10,11
13/11/2011	4	10,52
15/11/2011	6	10,86
17/11/2011	8	11,16
19/11/2011	10	11,40
21/11/2011	12	11,61
23/11/2011	14	11,79
25/11/2011	16	11,95
27/11/2011	18	12,07
29/11/2011	20	12,18
01/12/2011	22	12,28
03/12/2011	24	12,36
05/12/2011	26	12,42
07/12/2011	28	12,48
09/12/2011	30	12,53
11/12/2011	32	12,57
13/12/2011	34	12,60
15/12/2011	36	12,63

Fonte: Autora (2022)

Os valores de 30/09/2011 a 09/11/2011, o trecho B (durante a cravação de estacas); e a partir do dia 11/11/2011, o trecho C (momento a partir da incorporação das estacas aos blocos até a última medição realizada).

Após definir os valores da tabela é possível elaborar o gráfico apresentado na Figura 94, com a curva formada pelo modelo proposto sobreposta aos valores medidos de recalque durante toda a obra.

Figura 94 – Curva medida e curva calculado pelo modelo para média de pilares (P314, P332, P305, P323)



Fonte: Autora (2022)

Observa-se que assim como os no pilar P305, para a média dos pilares a curva se comporta da mesma maneira com foi explicado para esse mesmo trecho.

APÊNDICE F – Cronograma de execução do reforço do Edifício A

Datas	Medição	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	MÉDIO
29/09/2003	L1																			
20/10/2003	L2																			
11/11/2003	L3																			
20/01/2004	L4																			
19/03/2004	L5																			
17/05/2004	L6																			
15/07/2004	L7																			
09/08/2004	L8																			
24/08/2004	L9																			
21/09/2004	L10																			
18/10/2004	L11																			
04/11/2004	L12																			
22/11/2004	L13																			
10/12/2004	L14																			
01/01/2005	L15																			
16/02/2005	L16																			
16/03/2005	L17																			
04/04/2005	L18																			
21/04/2005	L19																			
13/05/2005	L20																			
13/06/2005	L21																			
14/07/2005	L22																			
12/08/2005	L23																			
14/09/2005	L24																			
14/10/2005	L25																			



Fonte: Autora (2022)

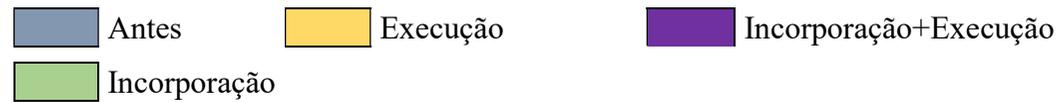
APÊNDICE G – Cronograma de execução do reforço do Edifício B

(Continua)

Datas	P332	P314	P323	P305	P333	P315	P324	P306	P322	P304	P331	P313	MÉDIO
14/09/2011	Amarelo												
29/09/2011	Amarelo												
05/10/2011		Amarelo											
10/10/2011	Verde	Amarelo											
22/10/2011		Amarelo											
28/10/2011		Verde											
29/10/2011			Amarelo										
01/11/2011			Amarelo										
04/11/2011			Verde	Amarelo									
09/11/2011				Amarelo									
13/11/2011				Verde									
15/11/2011													
26/01/2012					Amarelo								
28/01/2012					Amarelo								
29/01/2012					Verde								
06/02/2012						Amarelo							
08/02/2012						Amarelo							
09/02/2012						Verde							
14/02/2012							Amarelo						
15/02/2012							Verde	Amarelo					
17/02/2012								Amarelo					
18/02/2012								Verde					
28/03/2012									Amarelo				
30/03/2012									Amarelo				

(Conclusão)

Datas	P332	P314	P323	P305	P333	P315	P324	P306	P322	P304	P331	P313	MÉDIO
31/03/2012									Incorporação				
03/04/2012										Execução			
04/04/2012										Execução			
-										Incorporação			
15/03/2012											Execução		
17/03/2012											Execução		
18/03/2012											Incorporação		
20/03/2012												Execução	
21/03/2012												Execução	
22/03/2012												Incorporação	



Fonte: Autora (2022)